



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Plieninių kolonų, užpildytų betonu, turinčiu gumos atliekų, tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Iveta Malinauskaitė

Projekto autorė

asist. Deividas Martinavičius

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Plieninių kolonų, užpildytų betonu, turinčiu gumos atliekų, tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Iveta Malinauskaitė

Projekto autorė

asist. Deividas Martinavičius

Vadovas

vyresn. lekt. Gintaris Cinelis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Iveta Malinauskaitė

Plieninių kolonų, užpildytų betonu, turinčiu gumos atliekų, tyrimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Iveta Malinauskaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.):	
Plieninių kolonų, užpildytų betonu, turinčiu gumos atliekų, tyrimai	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-35 2025 gruodžio 1 d.	
(lietuvių k.): Plieninių kolonų, užpildytų betonu, turinčiu gumos atliekų, tyrimai	
(anglų k.): Research of Steel Columns Filled with Rubberized Concrete	
Pradiniai duomenys darbui:	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį):	
Atlikti:	Baigiamojo projekto dalys:
☒	Įvadas
☒	Literatūros apžvalga
☒	Metodologija
☐	Eksperimentiniai tyrimai
☒	Analitiniai tyrimai
☒	Skaitiniai tyrimai
☐	Ekonominė dalis
☒	Išvados
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo suderinimas su baigiamojo darbo vadovu:	
☐	Leidžiama
☒	Draudžiama
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo sąlygos (jei leidžiama), laikantis Universitete nustatytos GDI etiško naudojimo tvarkos:	
Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kas savaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	
Penktadieniais 12:00-13:00	

Vadovas:	asist. Deividas Martinavičius
(indėlis 100 %)	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Iveta Malinauskaitė
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Malinauskaitė, Iveta. Plieninių kolonų, užpildytų betonu, turinčiu gumos atliekų, tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas asist. dr. Deividas Martinavičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: plieninės kolonos, betonas, gumos atliekos, laikomoji galia, skaitinė analizė.

Kaunas, 2026. 50 p.

Santrauka

Didėjant reikalavimams mažinti statybinių atliekų kiekius ir didinti perdirbtų medžiagų panaudojimą statybos sektoriuje, vis dažniau ieškoma būdų į statybines konstrukcijas integruoti antrines žaliavas. Viena iš perspektyvių krypčių – perdirbtų padangų gumos atliekų įmaišymas į betoną. Šie mišiniai tampa aktualūs projektuojant konstrukcijas, ypač kolonų sistemas, kur svarbus konstrukcijos stipris.

Šiame magistro baigiamajame projekte nagrinėjamas betonu su gumos priedais užpildytų plieninių kolonų tinkamumas taikant jas pastatų laikančiosiose sistemose ir vertinant jų mechanines savybes. Projekto apimtyje analizuojama gumos įtaka betonui, plieninių profilių elgsenos pokyčiai ir kolonų laikomosios galios bei plastiškumo kitimas, palyginus skirtingus betono mišinius (NC, RuC5, RuC15). Atlikti analitiniai skaičiavimai pagal EC4 metodikas ir skaitinė analizė baigtinių elementų programine įranga leidžia įvertinti kolonų elgseną, skirtingų profilių (apvalaus ir kvadratinio) atsparumą bei gumos priedų poveikį konstrukcijos darbui.

Malinauskaitė, Iveta. Research of Steel Columns Filled with Rubberized Concrete. Master's Final Degree Project / supervisor Asst. Prof. Dr. Deividas Martinavičius; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: steel columns, concrete, rubber waste, bearing capacity, numerical analysis.

Kaunas, 2026. 50 pages.

Summary

As the requirements to reduce construction waste and increase the use of recycled materials in the construction sector increase, ways to integrate secondary raw materials into construction structures are increasingly sought. One of the promising directions is the mixing of recycled tire rubber waste into concrete. These mixtures are becoming relevant in the design of structures, especially column systems, where the strength of the structure is important.

This master's thesis examines the suitability of steel columns filled with concrete with rubber additives for their application in building load-bearing systems and evaluating their mechanical properties. The scope of the project analyzes the influence of rubber on concrete, changes in the behavior of steel profiles, and changes in the bearing capacity and plasticity of columns by comparing different concrete mixtures (NC, RuC5, RuC15). Analytical calculations performed according to EC4 methodologies and numerical analysis using finite element software allow us to evaluate the behavior of columns, the resistance of different profiles (circular and square) and the effect of rubber additives on the performance of the structure.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	13
1. Literatūros analizė.....	14
1.1. Bendrieji dalykai	14
1.2. Mechaninių savybių gerinimo būdai	14
1.2.1. Plieniniai vamzdžiai	14
1.2.2. Dvigubo sluoksnio plieniniai vamzdžiai	15
1.2.3. Gofruoti plieniniai vamzdžiai.....	17
1.2.4. Cheminis apdorojimas.....	17
1.2.5. Plieninis plaušas (fibra)	18
1.2.6. Smeigės.....	18
1.2.7. Geopolimerinis betonas	19
1.3. Gaisro poveikis.....	19
1.3.1. Gaisro poveikis tamprumo moduliui	21
1.4. Seisminis elgesys.....	23
1.5. Atsparumas šalčiui.....	24
Literatūros analizės išvados.....	25
2. Tyrimo metodologija	26
2.1. Skaičiuojamasis modelis	26
2.1.1. Geometrija ir baigtinių elementų modelis	26
2.1.2. Medžiagos ir mechaninės savybės.....	27
2.1.3. Apkrovos ir ribinės sąlygos	29
2.1.4. Skaitiniai rezultatai	29
2.2. CFST projektavimas	32
2.2.1. Skerspjūvio klasifikacija	32
2.2.2. Apvalaus skerspjūvio kolonų stiprumas.....	33
2.2.3. Kvadratinio skerspjūvio kolonų stiprumas.....	36
2.2.4. Prognozuojamos maksimalių apkrovų vertės pagal EC4	37
2.3. Tyrimo rezultatai	41
2.4. Optimalaus skerspjūvio nustatymas	43
Išvados	46
Literatūros sąrašas	47
Priedai.....	51
1 priedas. DI naudojimo deklaracija.....	51
2 priedas. Eksperimentiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės apvalaus skerspjūvio kolonomis	52
3 priedas. Eksperimentiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės kvadratinio skerspjūvio kolonomis	53
4 priedas. Skaitiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės apvalaus skerspjūvio kolonomis	54
5 priedas. Skaitiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės kvadratinio skerspjūvio kolonomis	56
6 priedas. Studentų mokslinės konferencijos „SMART BUILT ENVIRONMENT“ sertifikatas	58

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Stiprumo sumažėjimas naudojant RuC	15
2 lentelė. Mechaninių savybių palyginimas pagal formą [9-15]	16
3 lentelė. Gumos poveikis betone pagal formą [9-15]	16
4 lentelė. Tvarumo ir statybos efektyvumo palyginimas [9-15]	16
5 lentelė. CFST ir RuCFST geometrija.....	26
6 lentelė. Plieno mechaninės savybės	28
7 lentelė. Betono mechaninės savybės	28
8 lentelė. NC, RuC5 ir RuC15 mišinių proporcijos	28
9 lentelė. Skaitinės analizės kolonų ribinės apkrovos ir palyginimas su eksperimentinėmis ribinėmis apkrovomis.	31
10 lentelė. Skerspjūvio klasifikacija pagal EC4.....	33
11 lentelė. Prognozuojama apvalių kolonų ribinė apkrova pagal EC4	37
12 lentelė. Prognozuojama kvadratinių kolonų ribinė apkrova pagal EC4.....	38
13 lentelė. Prognozuojama apvalių kolonų ribinė apkrova pagal EC4 su alternatyviomis reikšmėmis.....	40
14 lentelė. Apvalių kolonų ribinės apkrovos	42
15 lentelė. Kvadratinių kolonų ribinės apkrovos	43
16 lentelė. Apvalaus ir kvadratinio kolonų geometrija optimalaus skerspjūvio nustatymui	43
17 lentelė. Skaitinės analizės kolonų ribinės apkrovos optimalaus skerspjūvio nustatymui	44

Paveikslų sąrašas

1 pav. RuCFST tamprumo modulių schema [17]	21
2 pav. Baigtinių elementų apvalaus skerspjūvio modelio geometrija ir tinklelis	27
3 pav. Baigtinių elementų kvadratinio skerspjūvio modelio geometrija ir tinklelis	27
4 pav. Kvadratinės S100x3_235_0_5_15 kolonos P-u kreivė gauta skaitiniu būdu.....	30
5 pav. Apvalios C219x4_235_0/5/15 kolonos P-u kreivė gauta skaitiniu būdu.....	30
6 pav. Kvadratinės S100x3_235_15 kolonos deformacija, gauta atlikus (a) skaitinę analizę ir (b) eksperimentinius bandymus	30
7 pav. Apvalaus skerspjūvio $P_u, EC4/P_u$, Exp grafikas	38
8 pav. Kvadratinio skerspjūvio $P_u, EC4/P_u$, Exp grafikas	39
9 pav. Apvalaus skerspjūvio $P_u, Est/P_u$, Exp grafikas	41
10 pav. Skaitinės analizės kolonų su NC P-u kreivės optimalaus skerspjūvio nustatymui	44
11 pav. Skaitinės analizės kolonų su RuC5 P-u kreivės optimalaus skerspjūvio nustatymui.....	44
12 pav. Skaitinės analizės kolonų su RuC15 P-u kreivės optimalaus skerspjūvio nustatymui.....	45
13 pav. Eksperimentinės P-u kreivės apvalaus skerspjūvio kolonomis: (a) C114x3_275_0/5/15, (b) C152x3_275_0/5/15, (c) C219x4_235_0/5/15, (d) C219x4_355_0/5/15 [8].....	52
14 pav. Eksperimentinės P-u kreivės kvadratinio skerspjūvio kolonomis: (a) S100x3_355_0/5/15, (b) S150x3_235_0/5/15, (c) S220x4_235_0/5/15, (d) S220x5_355_0/5/15 [8]	53
15 pav. Apvalios C114x3_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės.....	54
16 pav. Apvalios C114x3_275_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės.....	54
17 pav. Apvalios C152x3_275_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės.....	54
18 pav. Apvalios C219x4_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės.....	55
19 pav. Apvalios C219x4_355_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės.....	55
20 pav. Kvadratinės S100x3_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės	56
21 pav. Kvadratinės S100x3_355_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės	56
22 pav. Kvadratinės S150x3_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės	56
23 pav. Kvadratinės S220x4_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės	57
24 pav. Kvadratinės S220x5_355_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės	57

Santrumpų ir terminų sąrašas

CFCST – betonu užpildytas gofruotas plieninis vamzdis (angl. *concrete filled corrugated steel tube*);

CFDST – betonu užpildyti dvigubo sluoksnio plieniniai vamzdžiai (angl. *concrete filled double steel tubes*);

CFST – betonu užpildyti plieniniai vamzdžiai (angl. *concrete filled steel tubes*);

CST – gofruotas plieninis vamzdis (angl. *corrugated steel tube*);

RuC – batonas su gumos priemaišomis (angl. *rubberised concrete*);

RuCFDST – betonu su gumos priemaišomis užpildyti dvigubo sluoksnio plieniniai vamzdžiai (angl. *rubberised concrete filled double steel tubes*);

RuCFST – betonu su gumos priemaišomis užpildyti plieniniai vamzdžiai (angl. *rubberised concrete filled steel tubes*);

RuF-CFST – betonu su gumos priemaišomis ir plieninėmis fibromis užpildyti plieniniai vamzdžiai (angl. *rubberized fiber-reinforced concrete filled steel tubes*);

RuG – geopolimerinis betonas su gumos priemaišomis (angl. *rubberized geopolymer concrete*);

A_{concrete} – betono skerspjūvio plotas;

A_{steel} – plieno skerspjūvio plotas;

D_m – vamzdžio vidurio paviršiaus skersmuo;

E_{cm} – Jungo modulis;

E_{steel} – plieno Jungo modulis;

K_{cm} – plastinė deformacija, esant vienašiam gniuždymo stipriui;

N_{cr} – kolonos kritinė apkrova;

N_{pl} – kolonos plastinė apkrova;

N_{steel} – ašinis plieninio profilio stiprumas;

$P_{\text{u,Exp}}$ – eksperimentinės ribinės apkrovos;

$P_{\text{u,Num}}$ – skaitinės ribinės apkrovos;

$P_{\text{u,EC4}}$ – maksimali apkrova įvertinama pagal EC4;

$P_{\text{u,Est}}$ – patikslinta maksimali apkrova įvertinama pagal EC4;

f_{c2c} – dviašis gniuždymo stipris;

f_{cc} – apriboto betono stipris;

$f_{cm,cyl}$ – betono ekvivalentinis cilindrinis gniuždymo stipris;
 f_{cm} – gniuždomasis stipris;
 f_{ctm} – tempiamasis stipris;
 f_u – tempimo stipris;
 f_y – takumo riba;
 r_m – apskrito skerspjūvio vidurio paviršiaus spindulys;
 ε_{cm} – betono įtempiai;
 ε_u – tempimo deformacija;
 η_a – koeficientas atspindintis plieninio vamzdžio takumo įtempio sumažėjimą;
 η'_a – patikslintas koeficientas atspindintis plieninio vamzdžio takumo įtempio sumažėjimą;
 η_c – koeficientas atspindinti betono branduolio gniuždymo stiprio padidėjimą;
 η'_c – patikslintas koeficientas atspindinti betono branduolio gniuždymo stiprio padidėjimą;
 λ_G – bendras kolonos išlinkimo lieknumas;
 λ_L – vietinio liaunumo ribos;
 σ_{cr} – vamzdžio tamprusis kritinis išlinkimo įtempis;
 χ_1 – plastinio stiprio mažinimo koeficientas;
 B – ilgesnioji kolonos skerspjūvio kraštinė;
 b – trumpesnioji kolonos skerspjūvio kraštinė;
 D – kolonos išorinis skersmuo;
 H – kolonos aukštis;
 Q – gamybos kokybės parametras;
 r_e – išorinio kampo spindulys;
 t – vamzdžio storis;
 Δw_k – charakteristinė netobulumo amplitudės vertė;
 Ψ – išsiplėtimo kampas;
 ν – Puasono koeficientas.

Įvadas

Plečiantis gamybos ir transporto sektoriams, didėja gumos gaminių, ypač automobilių padangų, vartojimas. Tai lemia didelius nebeeksploatuojamų padangų kiekius, kuri tampa aplinkosaugos ir atliekų tvarkymo problema. Ieškant aplinkai draugiško ir tvaraus sprendimo, vis daugiau dėmesio skiriama gumos naudojimui statybinėse medžiagose, ypač betone.

Šiame darbe atliekama betono, sudėtyje turinčio aplinkai pavojingų atliekų (padangų atliekų) analizė. Analizuojama plieninių konstrukcijų, užpildytų tokiu betonu, konstrukcinę elgseną. Pagrindinis tyrimo tikslas – išanalizuoti plieninių konstrukcijų, užpildytų betonu, turinčiu padangų atliekų, optimalius panaudojimo atvejus atsižvelgiant į konstrukcinius reikalavimus.

Tyrimo tikslui įgyvendinti keliama šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti galiojančius standartus ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus siekiant išsiaiškinti naujausias tendencijas plieninių konstrukcijų, užpildytu betonu, turinčiu padangų atliekų, projektavimui.
2. Ištirti skirtingų plieninių profilių skerspjūvių elgseną, kai jie užpildyti betonu, turinčiu padangų atliekų.
3. Nustatyti optimalų konstrukcijų skerspjūvio tipą atliekant skaitinę analizę baigtinių elementų metodo programine įranga.
4. Pateikti projektavimo rekomendacijas ir galimus praktinio taikymo scenarijus tokio tipo konstrukcijoms, atsižvelgiant į konstrukcinius, aplinkosauginius ir tvarumo aspektus.

1. Literatūros analizė

Šiame skyriuje apžvelgiami mokslininkų atlikti tyrimai, susiję su gumos panaudojimu betone. Nagrinėjamos betono su gumos priemaišomis mechaninės savybės, galimos panaudojimo sritys ir identifikuojamos tyrimų spragos.

1.1. Bendrieji dalykai

Sparčiai didėjant gumos gaminių, ypač naudojamų transporto pramonėje, gamybai, susidaro didelis šių atliekų kiekis – panaudotų padangų kiekis visame pasaulyje kiekvienais metais viršija 17 mln. tonų. Padangų atliekos dėl savo cheminės sudėties ir struktūros yra itin atsparios biodegracijai, cheminiams reagentams ir aukštai temperatūrai, todėl didėjančios ir netinkamai eksploatuojamos padangų atliekos kelia pavojų žmonių sveikatai ir aplinkai. [1]

Vienas iš galimų tokios problemos sprendimo būdų yra perdirbtos gumos panaudojimas, įdedant ją į betoną, priklausomai nuo jos dydžio, pakeičiant tiek smulkius, tiek stambius užpildus. RuC (angl. *rubberised concrete*, liet. betonas su gumos priemaišomis) galėtų paskatinti nebeeksploatuojamų padangų perdirbimą ir sumažinti gamtinių išteklių gavybą. Toks betono mišinys yra ne tik saugus, aplinkai nekenksmingas ir ekonomiškai būdas panaudoti padangų atliekas, bet ir pagerina plastiškumą, energijos sugėrimą bei mechanines savybes, veikiant apkrovai ar gaisrui, lyginant su įprastu portlandcemenčiu betonu. [2]

Nepaisant geresnių deformacinių savybių, lyginant su įprastais betono užpildais, guma turi mažesnę tamprumo modulį ir didesnę Puasono koeficientą. Kadangi guma ir betonas turi žymiai skirtingas mechanines savybes. Apkrovos metu santykinė deformacija sąsajos perėjimo zonoje tarp gumos ir betono lemia ankstyvą įtrūkimą, taip pat didelius tempimo įtempius, statmenus gniuždymo apkrovai [4]. Dėl šios priežasties pagrindinis RuC trūkumas yra mažesnis stiprumas.

1.2. Mechaninių savybių gerinimo būdai

Didinant gumos proporciją betone, pastebimas stiprumo sumažėjimas. Siekiant padidinti RuC stiprumą, guma gali būti apdorojama chemiškai ar sustiprinama įkomponuojant plieninius elementus.

1.2.1. Plieniniai vamzdžiai

Tyrimai rodo, kad esant 30 % gumos kiekiui betone, jo stiprumas vidutiniškai sumažėja iki 80 %, tačiau naudojant plieninius vamzdžius – apie 20 % [3,5]. Vadinas, siekiant sumažinti RuC stiprumo trūkumą, gali būti naudojamas plieninis vamzdis.

CFST (angl. *concrete filled steel tubes*, liet. betonu užpildyti plieniniai vamzdžiai) yra lengvesni ir didesnio stiprumo, lyginant su kiekvienu atskiru komponentu. Lyginant kvadratinis ir apvalius plieninius profilius, užpildytus betonu, apvalus skerspjūvis rodo geresnius rezultatus. Kvadratiniai ir stačiakampiai profiliai yra lengvesni, lyginant su apskritais, ir dažnai naudojami dėl savo dizaino, jie gerai atlaiko ašinės ir lenkimo apkrovas, tačiau juose greičiau atsiranda vietinės deformacijos. Apvalaus skerspjūvio profiliuose apkrovos pasiskirsto efektyviau, deformacijos juose yra mažesnės, jie yra plastiškesni, todėl jie yra geresnis pasirinkimas konstrukcijoms, kur veikia labai didelės ašinės apkrovos. Kiti profiliai, tokie kaip daugiakampiai ar elipsiniai, nepasiekia tokių gerų mechaninių savybių kaip keturkampės ar apvalios formos. [6,7]

A. P. C. Duarte ir kt. [8] atliktuose eksperimentiniuose tyrimuose su kvadratinio, stačiakampio ir apvalaus skerspjūvio bandiniais pastebima, kad RuCFST (angl. *rubberised concrete filled steel tubes*, liet. betonu su gumos priemaisomis užpildyti plieniniai vamzdžiai) kolonos yra plastiškesnės nei CFST, ypač tos, kurios turėjo apvalius skerspjūvius ir apvalaus skerspjūvio kolonų plastiškumas buvo didesnis nei kvadratinų ar stačiakampių skerspjūvių. Kvadratinų ir stačiakampių kolonų plastiškumas padidėjo apie 38 %, naudojant betono mišinį, kuriame buvo 15 % gumos, lyginant su įprastu betono mišiniu, o apvalaus skerspjūvio kolonų plastiškumas padidėjo 147 %. Toks skirtumas gali būti paaiškinamas tuo, kad apvaliuose skerspjūviuose nėra silpnų plokščių zonų lyginant su kvadratiniais ar stačiakampiais profiliais.

A. P. C. Duarte ir kt. [8] eksperimentiniai duomenys taip pat parodė, kad didžiausias stiprumo praradimas naudojant RuC yra kvadratinio skerspjūvio profiliuose. Geriausius rezultatus parodė stačiakampio skerspjūvio profiliai. Jų stiprumas naudojant 15 % gumos sumažėjo 18,8 %, lyginant su betono mišiniu, kuriame nebuvo naudojama guma. (žr. 1 lentelę) Apskriti vamzdžiai parodė vidutinius rezultatus, tačiau, kaip jau minėta anksčiau, šis nuostolis gali būti pateisinamas dėl geriausių plastiškumo savybių.

1 lentelė. Stiprumo sumažėjimas naudojant RuC

Skerspjūvis	Naudojant 5 % RuC	Naudojant 15 % RuC
Kvadratinis	10,3 %	32,9 %
Stačiakampis	11,3 %	18,8 %
Apvalus	9,8 %	22,3 %

Analizuojant eksperimentinių bandymų rezultatus ir remiantis Eurokodo 4 skaičiavimo metodais, pastebima, kad stipris kvadratiniams ir stačiakampiems skerspjūviams atitinka praktinius darbo rezultatus, todėl juos galima taikyti RuCFST kolonų projektavime, tačiau apvalaus skerspjūvio kolonų atveju, stipris pagal Eurokodą 4 buvo didesnis, ypač didėjant gumos kiekiui betone, todėl čia reikėtų įvesti korekcinis koeficientus, sumažinančius prognozuojamą stiprį. [8]

1.2.2. Dvigubo sluoksnio plieniniai vamzdžiai

Geresnius rezultatus už CFST rodo CFDST (angl. *concrete filled double steel tubes*, liet. betonu užpildyti dvigubo sluoksnio plieniniai vamzdžiai). Šie elementai susideda iš vidinio ir išorinio plieninio vamzdžio su tarp jų esančiu betonu. Dvigubo sluoksnio plieniniai profiliai atlaiko didesnę ašinę jėgą ir rodo geresnius rezultatus lenkiant nei viengubo vamzdžio profiliai. Jie taip pat yra lengvesni ir atsparesni gaisrui bei gali būti plastiškesni už CFST, kai atsižvelgiant į apkrovos sąlygas vidinis ir išorinis vamzdžiai yra proporcingi ir naudojamas tinkamas betono tipas. Taip pat CFDST konstrukcijos yra atsparesnės suvirinimo metu atsirandantiems įtempiams nei tradiciniai CFST, tačiau CFDST suvirinimas yra sudėtingesnis. Jei vidinis ir išoriniai vamzdžiai yra suvirinti, suvirinimo metu gali atsirasti dvigubi liekamieji įtempiai, o esant skirtingiems terminio plėtimosi koeficientams, gali atsirasti vidinės įtampos tarp sluoksnių. Taigi, netinkamas suvirinimo procesas gali pabloginti mechanines CFDST savybes, todėl tokio tipo profilių suvirinimas reikalauja papildomų atsargumo priemonių. [6,7]

Analizuojant skirtingų formų dvigubo sluoksnio plieninius vamzdžius su gumos priedais pastebima, kad geometrinė forma turi didelę įtaką kolonų mechaninėms savybėms, laikomajai galiai, atsparumui seisminėms apkrovoms ir tvarumui. (2-4 lentelės)

2 lentelė. Mechaninių savybių palyginimas pagal formą [9-15]

Savybė	Apvalus skerspjūvis	Kvadratinis skerspjūvis	Šešiakampis skerspjūvis
Atsparumas ašinei apkrovai	Mažiausias – dėl apvalios formos sunkiai pasipriešina ašinei apkrovai. Apvalių kolonų laikomoji galia vidutiniškai 10-15% mažesnė nei kvadratinė.	Turi didesnę atsparumą ašinei jėgai nei apvalaus skerspjūvio.	CFDST, kurio išorinis profilis šešiakampis, o vidinis – apvalus (HS forma), galėtų turėti didžiausią laikomąją galią.
Seisminis atsparumas	Geriausias - apvali forma tolygiai paskirsto įtempius, o energijos sugertis yra iki 35% didesnė nei kvadratinė.	Yra standžios formos, tačiau mažiau sugeria dinaminę apkrovą.	HS forma yra stabilesnė dėl plokščių paviršių, tačiau nesugeria vibracijų taip efektyviai kaip apvali forma
Atsparumas lenkimui	Mažiausias – jos labiau deformuojasi lyginant su kvadratinio skerspjūviu.	Stačiakampė forma leidžia gerai pasiskirstyti įtempiams.	Dėl kampų ir sujungimų gali atsirasti silpnesnės vietos esant lenkimo apkrovai.
Energijos sugertis	Geriausias – apvalios kolonos gali sugerti iki 70% daugiau energijos nei kitų profilių kolonos, todėl yra optimaliausias sprendimas seisminėse zonose.	Sugeria mažiau energijos nei apvalūs profiliai.	HS kolonos su guminiiais priedais gali sugerti iki 25% daugiau smūgio energijos nei tradicinės gelžbetoninės kolonos.

3 lentelė. Gumos poveikis betone pagal formą [9-15]

Aspektas	Apvalus skerspjūvis	Kvadratinis skerspjūvis	Šešiakampis skerspjūvis
Gumos įtaka stiprumui	Priklausomai nuo gumos kiekio, jei betone yra 15% gumos stiprumas gali sumažėti iki 20%	Priklausomai nuo gumos kiekio, jei betone yra 15 % gumos stiprumas gali sumažėti iki 15 %	Priklausomai nuo gumos kiekio, jei betone yra 15% gumos stiprumas gali sumažėti iki 12%
Optimalus gumos užpildo kiekis	15–30 % – priklausomai nuo seisminio atsparumo poreikių	10–15 % – daugiau nei 15 % gumos sparčiai mažina gniuždymo stiprį	15 % – optimali stiprumo ir elastingumo reikšmė
Profilio poveikis	Geriausiai išnaudoja plieną, nes tolygiai paskirsto įtempius	Plieno sluoksnis gerina lenkimo stiprumą ir sumažina įtrūkimų tikimybę	HS kolonomis plienas efektyviai sustiprina struktūrą - sumažina lokalius įtempius

4 lentelė. Tvarumo ir statybos efektyvumo palyginimas [9-15]

Kriterijus	Apvalus skerspjūvis	Kvadratinis skerspjūvis	Šešiakampis skerspjūvis
Konstrukcijos sudėtingumas	Paprasčiausia forma, nes mažai sujungimų, trumpiausias montavimo laikas	Standartinė konstrukcija su paprastomis jungtimis	Sudėtingiausia – reikalauja didelio tikslumo, ilgesnis montavimo laikas
Medžiagų sąnaudos	Mažiausios, nes efektyviai išnaudojama forma	Efektyvus plieno ir betono santykis	Didžiausios sąnaudos – reikalauja tikslumo ir 2400-2500 kg/m ³ papildomo plieno dėl sudėtingos formos
Tvarumas ir perdirbamų medžiagų naudojimas	Optimaliai išnaudojama guma. Galima panaudoti daugiausia perdirbtų medžiagų	Turi pranašumų, tačiau nėra tokia efektyvi kaip apvali	Gumos užpildai gerai pasiskirsto gaminyje, efektyvesni už kvadratinius profilius

Naudojant RuCFDST (angl. *rubberised concrete filled double steel tubes*, liet. betonu su gumos priemaišomis užpildyti dvigubo sluoksnio plieniniai vamzdžiai) su apvaliais skerspjūviais (vidiniu ir išoriniu), pastebima, kad plastiškumas kartu su energijos sugėrimu ženkliai padidėja, o trapus suirimo pobūdis – sumažėja. Nepaisant to, kai gumos kiekis viršija 15-30 % bendros užpildytos masės, gniuždymo stipris sparčiai mažėja. [9-12] RuCFDST su kvadratiniais skerspjūviais (vidiniu ir išoriniu) pasižymi dideliu atsparumu ašinėms apkrovoms bei geru stabilumu. Eksperimentiniai bandymai rodo, kad toks elementas yra mažiau efektyvus lyginant su RuCFDST su apvaliais skerspjūviais, dėl mažesnio plastiškumo, tačiau tai priklauso nuo tinkamų vamzdžių proporcijų parinkimo. Kai gumos kiekis kvadratiname skerspjūvyje viršija daugiau nei 15 % bendros užpildytos masės, stiprio mažėjimas yra staigesnis lyginant su apvaliu skerspjūviu. [13-14] Perspektyvi alternatyva galėtų būti šešiakampiai vamzdžiai. Nors tokių profilių efektyvumas nėra iki galo ištirtas, tačiau remiantis S. Manisha ir kt. [15] atliktais tyrimais, jie galėtų būti efektyvesni už kvadratinius skerspjūvius, dėl savo geometrinės formos, tačiau mažiau efektyvūs už apvalaus skerspjūvio vamzdžius.

1.2.3. Gofruoti plieniniai vamzdžiai

Tyrimai rodo, kad tiesių plieninių vamzdžių pakeitimas CST (angl. *corrugated steel tube*, liet. gofruotas plieninis vamzdis) gali žymiai pagerinti betoninio šerdies ašinį stiprumą ir tąsumą. CST sukuria žiedinio suspaudimo efektą ašinio gniuždymo metu, pagerindami kompozitinės kolonos tąsumą. Plieninių vamzdžių gofravimas gali pakeisti plieninio vamzdžio vertikalų įtempių pasiskirstymą. Ankstesni tyrimai taip pat nustatė, kad gumuotu betonu užpildyti CST gali pagerinti betoninio šerdies atsparumą įtrūkimams ir kompozitinės kolonos tąsumą. [23,24]

Y. Wang ir kt. [24] tyrimo rezultatai parodė, kad CFCST (angl. *concrete filled corrugated steel tube*, liet. betonu užpildytas gofruotas plieninis vamzdis) turi akivaizdžių pranašumų prieš tradicines gelžbetonines ar plieniu armuotas konstrukcijas. Atliekant eksperimentinius tyrimus, buvo ištirtas 21 trumpas stulpas, iš kurių dvylika buvo CFCST tipo, o likusieji – palyginimui skirti gelžbetoniniai, plieniniai ar nearmuoti betono stulpai.

Tyrimai rodo, kad gofruotas plieninis vamzdis, užpildytas betonu, veikia ne kaip pagrindinis ašinės apkrovos laikymo elementas, o kaip efektyvus betono branduolio apribojimo ir sustiprinimo iš šonų elementas. Plonasienis vamzdis beveik neprisideda prie ašinės apkrovos laikymo, tačiau dėl savo gofruotos formos stipriai riboja betono šoninę deformaciją ir leidžia padidinti tiek jo laikomąją galią, tiek deformacinį atsparumą. Pastebėta, kad konfinavimo efektas labiausiai pasireiškia vamzdžio keterose, kur susikaupia didžiausios įtempių ir deformacijų vertės. [24]

Eksperimentai parodė, kad CFCST gali išlaikyti didesnes apkrovas nei kiti analogiško plieno kiekio elementai. Pavyzdžiui, CFCST ašinė laikomoji galia buvo apie 5 % didesnė nei tradicinių plieniu armuotų vamzdinių konstrukcijų ir apie 28 % didesnė nei paprastų gelžbetoninių stulpų. Taip pat labai ženkliai pagerėjo deformacinės savybės – CFCST didžiausios deformacijos momentu, kai pasiekama didžiausia apkrova, buvo 47 % didesnės nei plieninių vamzdžių konstrukcijų ir net 92 % didesnės nei gelžbetoninių. [24]

1.2.4. Cheminis apdorojimas

Norint pagerinti RuC stiprumą, vienas iš būdų yra gumą iš anksto apdoroti sieros rūgštimi (H_2SO_4). Toks apdorojimas sukelia paviršiaus oksidaciją ir sukuria porėtą, šiurkštų paviršių. Gumos ir sieros

rūgšties reakcija vyksta ore kelias minutes, o po to yra svarbu neutralizuoti paviršių ir skalauti gumą distiliuotu vandeniu, kol jo pH tampa neutralus. Taip nuo paviršiaus yra pašalinami priedai, vaškas, alyva, o mechanškai dėl paviršiaus pokyčių pagerėja gumos sukibimas su betonu. [16]

Dar vienas ir dažniausiai praktikoje naudojamas metodas siekiant pagerinti betono užpildyto gumos dalelėmis stiprumą, tai kad guma gali būti iš anksto apdorojama natrio hidroksidu (NaOH). Norint išvengti oksidacijos ir padaryti gumą vandeniui atsparią, padangose naudojamas cinko stearatas chemiškai reaguoja su NaOH ir gamina tirpią natrio stearato druską, todėl gumos dalelės turi būti plaunamos tol, kol jų pH yra neutralus ir kol nebelieka NaOH arba natrio stearato likučių. Toks išankstinis apdorojimas pašalina nešvarumus nuo gumos ir pakeičia jos paviršiaus morfologiją, taip padidindamas sukibimą tarp gumos dalelių ir betono. Toks apdorojimas, lyginant su neapdorota guma, stiprumą gniuždant gali pagerinti 25 %. [2]

1.2.5. Plieninis plaušas (fibra)

Norint pagerinti mechanines RuC savybes, į betono mišinį galima įtraukti plienines fibras (angl. *steel fibers*). Šios fibros pagerina standumo charakteristikas. Bandymai rodo, kad po terminio poveikio, kai betono mikrostruktūra buvo pažeista, fibros veikė kaip mikroįtrūkių plitimą stabdantis komponentas, išlaikantis medžiagos vientisumą ir taip užtikrinantis efektyvesnį įtempių pasiskirstymą konstrukcijoje. Kita svarbi savybė – plastiškumo pagerėjimas. Fibros reikšmingai padidino konstrukcijos plastiškumo indeksą, ypač esant kambario temperatūrai. Pavyzdžiui, 1 % skaidulų tūrio dalis padidino plastiškumo rodiklį beveik tris kartus, palyginti su konstrukcija be skaidulų. Šis efektas rodo, kad skaidulos prisideda prie konstrukcijos gebėjimo deformuotis nepažeidžiant vientisumo, tai itin svarbu esant seisminiams ar smūginiams apkrovų poveikiams. Taip pat pastebėta, kad plieninės fibros pagerino stiprumo charakteristikas – konstrukcijų atsparumas ašiniam gniuždymui padidėjo iki 10 %. Tai siejama su skaidulų gebėjimu perduoti jėgas per įtrūkusias zonas ir pagerinti skiedinio bei užpildo sukibimą, ypač kai skiedinys paveikiamas šilumos ir atsiranda mikroįtrūkimai. [17]

1.2.6. Smeigės

M. Ami ir kt. [26] nagrinėjo betonu su guma užpildytą, dvigubų plieninių vamzdinių stiprinimą naudodami smeiges su galvute (angl. *headed studs*). Įrengus smeiges tarp išorinio ir vidinio plieninių vamzdžių, įmanoma ženkliai pagerinti betonu su guma užpildytą kolonų sąveiką ir tuo pačiu padidinti jų stiprumą, išlaikant gerą plastiškumą ir energijos sugėrimo gebą.

Tyrimai rodo, kad smeigių naudojimas turi itin reikšmingą poveikį kolonų elgsenai. Visų pirma, šios smeigės sustiprino ryšį tarp išorinio ir vidinio vamzdžio bei tarp plieno ir betono sluoksnių. Tokiu būdu buvo pasiekta geresnė visų medžiagų sąveika veikiant ašinei apkrovai – tai reiškia, kad visa konstrukcija elgėsi labiau kaip vientisas darinys, o ne kaip keli atskiri komponentai. Esminis rezultatas buvo tas, kad smeigių įrengimas leido labai efektyviai kompensuoti laikančiosios galios sumažėjimą, kurį sukėlė gumos įterpimas į betoną. Pavyzdžiui, kai kolonos buvo užpildytos RuC mišiniu su 20 % gumos dalelių, jų galutinė laikomoji galia sumažėdavo, tačiau pridėjus smeiges (ypač kai jų tarpai buvo sumažinti iki 50 mm), stiprumas padidėdavo net iki 54 %. [26]

Be to, smeigės ne tik padidino stiprumą, bet ir pagerino konstrukcijos energijos sugėrimo gebą ir plastiškumą. Taip yra todėl, kad smeigės sukuria papildomą šoninį suvaržymą betonui, mažina plieninių vamzdžių lokalų linkimą ir prisideda prie tolygesnio įtempių pasiskirstymo. Ypač

pastebėtas teigiamas efektas, kai smeigių tarpai buvo sumažinti – kuo arčiau jie buvo vienas kito (pvz., kas 50 mm), tuo efektyvesnis buvo jų poveikis. Tokiu atveju, konstrukcijai būdingas gerokai didesnis atsparumas lokaliniam plieninių vamzdžių linkimui, mažesnis betono skilinėjimas ir labiau išplėtotas plastinės deformacijos prieš suirimą. Paprastai konstrukcijos, kurios pasižymi didele laikančiąja galia, yra standžios, bet mažai plastiškos. Tačiau smeigės leidžia išlaikyti arba net pagerinti plastiškumą, ypač kai naudojamas RuC. Pavyzdžiui, naudojant smeiges, konstrukcijos su 20 % gumos mišiniu būdingas plastiškumo padidėjimas iki 70 %, o energijos sugėrimo geba padidėjo iki 200 %, palyginti su įprastomis kolonų versijomis. [26]

1.2.7. Geopolimerinis betonas

Dar vienas mechaninių savybių gerinimo būdas gali būti gumos panaudojimas geopolimeriniame betone. Geopolimerinis betonas – tai alternatyva tradiciniam portlandcemenčiu pagrįstam betonui, pasižymintis mažesniu aplinkos poveikiu ir geromis inžinerinėmis savybėmis. Vietoj cemento kaip rišiklis naudojamos pramoninės atliekos. Šios medžiagos aktyvuojamos šarminiu tirpalu (pvz., natrio hidroksidu ar natrio silikatu), kuris sukelia geopolimerizacijos reakciją – tai procesas, kurio metu susidaro erdvinė aliumosilikatinė struktūra, veikianti kaip rišiklis.

S. Lu ir kt. [30] nagrinėja plieninius vamzdžius užpildytus RuG (angl. *rubberized geopolymer concrete*, liet. geopolimerinis betonas su gumos priemaisomis). Tyrime nagrinėjami bandiniai su plieniniu vamzdžiu, nutrauktu ties abiem kolonos galais (ST-RuG) ir plieniniu vamzdžiu per visą kolonos ilgį (SC-RuG). Tyrimo rezultatai atskleidžia, kad ST-RuG tipo kolonos pasižymi geresnėmis mechaninėmis savybėmis nei kolonos, turinčios nenutrūkstamą plieninį apvalkalą (SC-RuG). Nutrauktas plieninis vamzdis, apribotas tik vidurinėje kolonos dalyje, efektyviau įkalina betoną, mažindamas vietinį plieninio vamzdžio išsipūtimą ir gerindamas deformacijų pasiskirstymą, tai galiausiai lemia didesnę viršūninę ir likutinę kolonų stiprį.

Tyrime taip pat paaiškėjo, kad didinant gumos dalelių kiekį betono mišinyje, kolonų laikomoji galia reikšmingai mažėja. Esant didžiausiam tirtam gumos kiekiui, pastebėtas iki 37,6 % stiprio sumažėjimas. Vis dėlto, gumos įmaišymas prisidėjo prie kolonų plastiškumo padidėjimo – tai reiškia, kad kolonos galėjo deformuotis labiau prieš suirimą. Tokie rezultatai rodo, kad net jei stipris mažėja, konstrukcijos tampa atsparesnės staigiems lūžiams. [30]

Lyginant geopolimerinio betono kolonas (ST-RuG) su tomis, kurios užpildytos įprastiniu portlandcemenčiu pagrįstu betonu (ST-RuO), nustatyta, kad geopolimerinio betono kolonos turi didesnę stiprį. Tačiau jų elastingumo modulis yra mažesnis, jos elgiasi trapiai – deformacijos mažėja greičiau, nei ST-RuO atveju. Vis dėlto, dėl geresnio ryšio tarp gumos dalelių ir geopolimerinio betono, ST-RuG kolonomis būdingas šiek tiek geresnis deformacinis pajėgumą nei ST-RuO. [30]

1.3. Gaisro poveikis

Gaisro poveikis pažeidžia pastato konstrukcinį vientisumą ir kelia pavojų, jei pažeista konstrukcija yra ir toliau eksploatuojama. Padidėjusi temperatūra blogina plieno savybes, paveikdama mechanines charakteristikas. Be to ugnis mažina betono savybes, tokias kaip tempiamasis ir gniuždomasis stipris bei tamprumo modulis. RuC esančios gumos dalelės yra jautrios aukštai temperatūrai, todėl gaisro metu pablogėja mechaninės savybės. [18]

A. Marques ir kt. [19] teigia, kad RuC, veikiamas 400, 600 ir 800 °C temperatūros, kai natūralus užpildas buvo pakeistas skirtingomis gumos proporcijomis, parodė ryškesnį tempiamojo ir gniuždomojo stiprio, taip pat tamprumo modulio sumažėjimą, didėjant gumos kiekiui mišinyje. H. Bengar ir kt. [20] nagrinėjo RuC mechanines savybes, kai smulkus užpildas buvo pakeistas 5%, 10%, 15% ir 20% santykiu gumos, esant 200, 400, 600 ir 800 °C temperatūrai. Atliktas tyrimas parodė, kad betoninių bandinių fizikinės ir mechaninės savybės pablogėjo didėjant temperatūrai. Didžiausias gniuždymo ir tempimo stiprumo sumažėjimas, apie 90 %, buvo pastebėtas esant 800 °C temperatūrai. RuC bandiniai su 10% gumos, visiškai suiro, kai buvo veikiami 750 °C temperatūros 120 minučių dėl gumos irimo. Labai porėta RuC struktūra yra pagrindinė irimo priežastis, o skaidymasis vyksta aukštesnėje nei 150 °C temperatūroje. Aukštesnėje nei 400 °C temperatūroje prasideda kalcio silicio hidratų skaidymasis, dėl kurio sumažėja sukibimas tarp gumos ir betono ir dėl to prarandamas stiprumas. Be to, vanduo, susikaupęs RuC tuštumose, išgaruoja veikiamas aukštos temperatūros, padidindamas betono poringumą ir dar labiau susilpnindamas betoną. Ryšio pablogėjimo greitis aukštoje temperatūroje yra labiau pastebimas RuC dėl padidėjusio poringumo, kurį sukelia išsilydžiusios gumos dalelės, didesnio šilumos laidumo, kurį sukelia šis poringumas, ir papildomos šilumos, susidarancios dėl terminio skaidymo. [21,22]

Nepaisant palankių RuCFST elementų eksploatacinių savybių, gaisras kelia didelį iššūkį šioms konstrukcijoms. Gaisro metu didelis plieno šilumos laidumas lemia greitą jo stiprumo ir standumo blogėjimą, o tai dar labiau pablogina betono irimą. Po vienodo gaisro poveikio RuCFST kolonos konstrukcinėms savybėms po gaisro įtakos turi maksimali temperatūra, kurią kiekviena skerspjuvio dalis pasiekia per visus šildymo ir aušinimo etapus. Šis temperatūros pasiskirstymas yra netolygus ir netiesinis dėl RuC šiluminės inercijos. Todėl gaisro sukeltas RuC pablogėjimas taip pat pasižymi netolygiomis ir netiesinėmis savybėmis, o tai kelia didelių iššūkių prognozuojant RuCFST kolonų konstrukcines savybes po gaisro. Esamos empirinės formulės CFST kolonų liekamojo ašinio stiprumo prognozavimui paprastai yra pagrįstos kreivių pritaikymo bandymais ir baigtinių elementų bandymų rezultatais. Šios formulės dažnai neturi fizikinės reikšmės, o jų tikslumas ir pritaikomumas labai priklauso nuo regresinių imčių tikslumo. RuC pasižymi geresnėmis šilumos izoliacijos savybėmis dėl mažesnio gumos šilumos laidumo, palyginti su įprastais užpildais. Dėl to temperatūros pasiskirstymas RuCFST elementuose labai skiriasi nuo CFST, užpildyto įprastu betonu. [18]

Nepaisant RuC stiprumo ir tamprumo modulio sumažėjimo dėl padidėjusios temperatūros, gumos užpildai gali būti naudingi RuC elgsenai aukštoje temperatūroje. Kaip jau minėta RuC pasižymi geresnėmis šilumos izoliacijos savybėmis dėl mažesnio gumos šilumos laidumo, kuris paprastai svyruoja nuo 0,1 iki 0,25 W/mK, palyginti su įprastų užpildų šilumos laidumu, kuris yra maždaug 1,5 W/mK. Gumos panaudojimas gali dar labiau sumažinti betono šilumos laidumą iki 50 %, ir šis mažėjimas tęsiasi, kai užpildas tampa smulkesnis. Tyrimai parodė, kad 10–30 % smėlio pakeičiant guma, šilumos laidumas sumažėja iki 50 %, o šilumos perdavimas – daugiau nei 54 %. [18]

Vandens garavimo elgsena RuC betone skiriasi nuo įprasto betono: gaisro sukeltas dalinis gumos dalelių išsilydymas, vėlesnis susitraukimas ir papildomos laisvos erdvės susidarymas betone aplink šias daleles. Esant aukštesnei temperatūrai, įtrūkimai aplink gumos daleles plečiasi, todėl jos dar labiau garuoja ir susidaro tuneliai tarp gumos dalelių ir porų. Šie tuneliai efektyviai išskiria porų slėgį, sumažindami skilimo riziką. Dėl RuC ir įprasto betono temperatūros laukų ir temperatūros pablogėjimo skirtumų po gaisro susidaro skirtingos savybės, todėl kyla abejonių dėl tiesioginio įprastinio CFST tyrimų rezultatų taikymo RuCFST betonui. [18]

1.3.1. Gaisro poveikis tamprumo moduliui

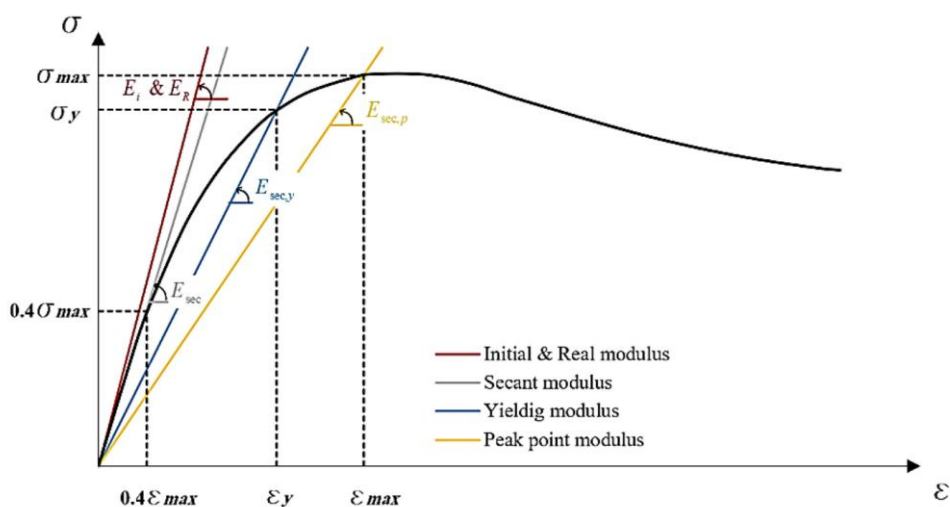
Tamprumo modulis yra pagrindinė kompozitinių kolonų su gumos priemaisomis savybė, atsižvelgiant į eksploatacinį tinkamumą ir konstrukcijų eksploatacines savybes. Tamprumo modulio pervertinimas gali lemti neteisingus ir nesaugius rezultatus, atsižvelgiant į pagrindinį tamprumo modulio vaidmenį nustatant tampriąsias deformacijas ir poslinkius konstrukcijų seisminiame projektavime.

M. Nematzadeh ir kt. [17] nagrinėja gaisro poveikį elastingumo moduliui RuF-CFST kolonose. (angl. *rubberized fiber-reinforced concrete filled steel tubes*, liet. betonu su gumos priemaisomis ir plieninėmis fibromis užpildyti plieniniai vamzdžiai). Tyrime įvertinamas elementų standumo pokytis po aukštos temperatūros, imituojančios gaisrą, bei sukuriamas elastingumo modulio prognozavimo modelis. Eksperimentiniu būdu išbandyti 57 stulpeliai esant 20, 250, 500 ir 750 °C temperatūroms, keičiant gumos kiekį (0–10 %), plieninių fibrų kiekį (0–1,5 %) bei plieno vamzdžio diametro ir storio santykį. Tyrimo rezultatai parodė, kad didėjant temperatūrai ženkliai mažėja betono ir visos sekcijos standumas: esant 750 °C, elastingumo modulis sumažėjo iki 70 %. Gumos dalelės sumažino betoninės šerdies elastingumą iki 18 %, tačiau plieninės fibros turėjo teigiamą poveikį – standumas padidėjo iki 10 %. Storesnis plieno vamzdis lėmė iki 34 % standumo padidėjimą.

Pasiūlyti du teoriniai modeliai, apimantys medžiagų savybių bei temperatūros poveikį, pasižymėjo dideliu tikslumu (vidutinė paklaida ~1–5 %) ir gali būti taikomi vertinant konstrukcijų likutinę gebą po gaisro. Darbe įrodyta, kad kombinuotas perdirbtų medžiagų (padangų gumos) ir plieninių fibrų naudojimas CFST kolonose gali būti efektyvus tiek aplinkosauginiu, tiek konstrukciniu požiūriu. 1 paveikslėlyje pateikta penkių analizuojamų tamprumo modulių tipų schema. [17]

Toliau aptariami atskiri tamprumo moduliai:

- Pradinis tamprumo modulis;
- Tikrasis tamprumo modulis;
- Tamprumo modulis ties tamprumo riba;
- Tamprumo modulis ties takumo riba;
- Tamprumo modulis ties stiprumo riba.



1 pav. RuCFST tamprumo modulių schema [17]

Pradinis tamprumo modulis.

Pradinis tamprumo modulis (E_i) apskaičiuojamas kaip pradinis ašinio įtempio ir deformacijos grafiko nuolydis. Čia deformacija apskaičiuojama kaip bendros kolonos deformacijos, gautos naudojant išilginius tiesinius kintamuosius diferencialinius transformatorius (angl. *linear variable differential transformers* - LVDT), ir bendro kolonos ilgio santykis. Akivaizdu, kad atsižvelgiant į galinius efektus, bendra kolonos deformacija yra didesnė už faktinę deformaciją arba deformaciją kolonos vidurinėje srityje, taigi, pradinis tamprumo modulis, apskaičiuotas naudojant LVDT, yra mažesnis už tikrąjį tamprumo modulį. [17]

M. Nematzadeh ir kt. [17] atlikto tyrimo metu nustatyta, kad pradinis elastingumo modulis yra jautrus temperatūrai. Padidėjus temperatūrai iki 750 °C, šio modulio reikšmės sumažėjo net iki 63 %. Nors gumos dalelės turėjo neigiamą poveikį (iki 17 % sumažėjimas), plieninės fibros kompensavo šį praradimą, padidindamos standumą iki 5 %, ypač esant aukštai temperatūrai. Taip pat pastebėta, kad storesni plieniniai vamzdžiai, turintys mažesnę diametro ir storio santykį, padidino pradines standumo reikšmes iki 50 %, kas rodo, jog plieno indėlis į pradinį standumą yra reikšmingas.

Tikrasis tamprumo modulis.

Panašiai kaip ir pradinis tamprumo modulis, tikrasis RuF-CFST tamprumo modulis (E_R) apskaičiuojamas naudojant pradinį ašinio įtempio ir deformacijos grafiko nuolydį. Tačiau šiuo atveju deformacija gaunama naudojant išilginius deformacijos daviklius, įrengtus kolonos viduryje, todėl neatsižvelgiama į galinius efektus. Todėl tamprumo modulio vertės yra tikrosios vertės. [17]

M. Nematzadeh ir kt. [17] atlikto tyrimo metu nustatyta, kad tikrasis elastingumo modulis reikšmingai sumažėjo su temperatūra – net iki 51 % esant 750 °C. Guma sumažino šį tamprumo modulį iki 15 %, o plieninės skaidulos turėjo kiek didesnę poveikį nei E_i atveju. Storesni plieniniai apvalkalai ženkliai padidino E_R – iki 33 %. Pastebėta, kad tikrasis modulis yra 2–3 kartus didesnis nei pradinis.

Tamprumo modulis ties tamprumo riba.

Tamprumo modulis ties tamprumo riba (E_{sec}) yra įprastas tamprumo modulis, kuris apskaičiuojamas pagal ašinės įtempio ir deformacijos kreivės nuolydį ties 0,4 didžiausio įtempio. Čia įtempio ir deformacijos kreivei ir tokiu būdu tamprumo moduliui nustatyti naudojama reali deformacija (gauta iš deformacijos matuoklių). [17]

M. Nematzadeh ir kt. [17] atlikto tyrimo metu nustatyta, kad tamprumo modulis ties tamprumo riba, apskaičiuotas ties 40 % maksimalios apkrovos, atskleidė, kaip konstrukcija elgiasi pereinant iš elastingosios į plastinę būseną. Su temperatūros didėjimu iki 750 °C, E_{sec} sumažėjo iki 60 %. Kaip ir kitų tamprumo modulių atveju, gumos dalelės sumažino tamprumo modulį (iki 17 %), o plieninės skaidulos jį nežymiai padidino – iki 7 %. Vamzdžio sienelės storis turėjo itin ryškią įtaką šiam moduliui – padidėjo net iki 37 %.

Tamprumo modulis ties takumo riba.

Kompozitinio profilio plieno takumo ribos tamprumo modulis ($E_{sec,y}$) yra plieninio vamzdžio takumo ribos modulis, gaunamas kaip takumo gniuždymo stiprio ir atitinkamos ašinės deformacijos santykis. Šis modulis yra įtempio ir deformacijos kreivės, jungiančios pradžios tašką su plieninio vamzdžio

takumo riba, sekantinis nuolydis. Čia tikroji deformacija (gauta iš deformacijos matuoklių) taip pat naudojama tamprumo moduliui takumo riboje nustatyti. [17]

M. Nematzadeh ir kt. [17] atlikto tyrimo metu nustatyta, kad elastingumo modulis ties takumo riba sumažėjo iki 50 % aukščiausioje temperatūroje. Šis modulis buvo ypač jautrus temperatūrai, tačiau mažiau veikiamas nei betono savybės. Gumos dalelės turėjo neigiamą poveikį, sumažindamas standumą iki 18 %, o plieninės skaidulos padėjo jį padidinti iki 8 %. Šio modulio reikšmės siekė apie 40–60 % tikrojo elastingumo modulio, atspindėdamos plieno elgseną iki jo plastinių deformacijų pradžios.

Tamprumo modulis ties stiprumo riba.

Tamprumo modulis ties stiprumo riba ($E_{sec,p}$) yra tamprumo modulis įtempio ir deformacijos kreivės aukščiausiam taške, apskaičiuojamas kaip gniuždymo stiprio aukščiausiam taške ir atitinkamos deformacijos santykis. Panašiai kaip ir aukščiau aprašytais atvejais, tamprumo moduliui ties stiprumo riba nustatyti taip pat naudojama tikroji deformacija (gauta iš deformacijos matuoklių). [17]

M. Nematzadeh ir kt. [17] atlikto tyrimo metu nustatyta, kad elastingumo modulis ties aukščiausiu tašku buvo labiausiai pažeidžiamas aukštų temperatūrų poveikiui – kai kuriais atvejais jis sumažėjo net 70 %. Gumos poveikis buvo neigiamas, o skaidulų įtaka – teigiama. Storesni vamzdžiai pasirodė esą itin naudingi – padidino $E_{sec,p}$ iki 34 %.

1.4. Seisminis elgesys

Pastaraisiais metais Kinija skatina naudoti surenkamus tiltus ir pažangias statybos technologijas, todėl CFST kolonos statomos didelio intensyvumo seisminėse zonose, sudėtingose kalnuotose vietovėse ir miesto surenkamuose tiltuose [25].

Siekdami išspręsti betonu užpildytų plieninių vamzdžių (CFST) apribojimus, mokslininkai pasiūlė pagerinti betonu užpildytų plieninių vamzdžių kolonų atsparumą vietiniam išlinkimui, seisminį tįsumą ir slopinimo koeficientą medžiagų požiūriu. Kaip jau minėta, atlikti eksperimentai su RuCFST rodo, kad jie pasižymi didesniu tįsumu nei įprasti betoniniai elementai dėl to, kad betonas su gumos dalelėmis yra apribotas plieniniais vamzdžiais. Nors RuCFST, palyginti su CFST, yra silpnesni ir mažiau standūs, jų tįsumas linkęs didėti didėjant gumos kiekiui. RuCFST siūlo perspektyvų sprendimą žemės drebėjimų zonų konstrukcijoms, kurioms reikalingas konstrukcinis tįsumas ir energijos išsklaidymo pajėgumas. Jie gali būti naudingi medžiagų savybėmis, kad dar labiau pagerintų CFST seisminį tįsumą ir energijos išsklaidymo pajėgumą. [8,23]

M. Feng ir kt. [23] nagrinėjamas inovatyvus statybinės konstrukcijos sprendinys – betonu su guma užpildytos gofruoto plieno vamzdinės kolonos jungtis su pamatu. Tyrimo tikslas buvo įvertinti tokios jungties seisminį elgesį bei suformuluoti projektavimo metodiką, pritaikomą praktikoje. Eksperimentų metu buvo nustatyta, kad siūloma jungtis pasižymi aukštu konstrukciniu efektyvumu esant žemės drebėjimo apkrovoms. Plastinės deformacijos koncentravosi kolonos apačioje ir pastebėta, kad tiek tradicinė betonu išlieta jungtis, tiek betonu su guma išlieta su $1,0 D_{in}$ įtvirtinimo gyliu (kur D_{in} – vamzdžio vidinis skersmuo) elgėsi labai panašiai – jų stiprumas ir pradinis standumas reikšmingai nesiskyrė. Tačiau kai įtvirtinimo gylis padidintas iki $1,25 D_{in}$, tiek stiprumas, tiek plastiškumas pagerėjo – vidutiniškai apie 14 % didesnė maksimali laikomoji jėga ir apie 19 % didesnis plastiškumo koeficientas.

1.5. Atsparumas šalčiui

Šaltuose regionuose, kuriems būdinga žema vidutinė metinė temperatūra ir dažni sausų ir drėgnų sąlygų kaita, laikui bėgant patiria didelę žalą dėl užšalimo ir atšilimo ciklų. Šią žalą dar labiau padidino pasauliniai klimato pokyčiai, pavyzdžiui, vis dažnesnės itin žemos temperatūros ir šalčio bangos, kurios sustiprina užšalimo ir atšilimo poveikį. Dėl to po tokių ciklų betono mechaninės savybės labai pasikeičia, o tai sukelia didesnius įtrūkimus, eroziją ar net staigius bendrus gedimus. Tyrimai rodo, kad guma atlieka svarbų vaidmenį didinant betono atsparumą šalčiui. Pakeitus 10 % smulkių užpildų 0–1 mm dydžio gumos dalelėmis, betono atsparumas šalčiui buvo panašus į betono, sumaišyto su orą įtraukiančiomis medžiagomis, atsparumą šalčiui. [27-29]

X. Han ir kt. [27] atliko betono su guma tyrimus atsparumo šalčio-atšilimo ciklams. Tyrimo metu buvo nustatyta, kad, esant 2–4 % gumos kiekiui betono tūryje, betono atsparumas šalčiui padidėja – pavyzdžiui, betonas, turintis 3 % gumos, atlaikė net iki 275 užšalimo-atšilimo ciklų. Tačiau kai gumos kiekis viršijo 3 %, betono atsparumas vėl sumažėjo, kadangi perteklinė guma sudarė mikrodefektų zonas, kurios tapo silpnomis vietomis šaltyje. Be to, tyrimas parodė, kad tradiciniai šalčio atsparumo vertinimo metodai nėra pakankamai tikslūs vertinant gumą turinčio betono būklę. Todėl buvo sukurta nauja vertinimo metodika, kuri tiksliau atspindi ne tik paviršiaus pažeidimus, bet ir vidinės struktūros pokyčius, apjungiant svarbiausius parametrus – masės netekimą, dinaminį elastingumo modulį ir jo pokyčius. Ši metodika laikoma pranašesne ir tiksliau prognozuojančia realų atsparumą šalčiui, ypač kai naudojamos netradicinės medžiagos kaip atliekų guma.

Literatūros analizės išvados

1. Atsižvelgiant į atliktus tyrimus, padangų atliekų integracija į betoną leidžia ne tik sumažinti aplinkos taršą, bet ir suteikia betonui tam tikrų privalumų – didesnę plastiškumą, energijos sugėrimą bei geresnį atsparumą seisminėms apkrovoms. Vis dėlto, gumos dalelės mažina gniuždomąjį stiprį ir tamprumo modulį, todėl būtina optimizuoti jų kiekį.
2. Plieninių vamzdžių forma daro esminę įtaką mechaninėms savybėms: dvigubo sluoksnio plieniniai vamzdžiai demonstruoja geresnes mechanines savybes nei viengubo profilio vamzdžiai. Jie efektyviau apriboja betono deformacijas, pagerina konstrukcijos vientisumą ir ilgaamžiškumą.
3. Plieninių fibrų, smeigių bei cheminio gumos apdorojimo taikymas reikšmingai pagerina RuC mechanines savybes – padidėja stiprumas, pagerėja plastiškumas ir energijos sugėrimas.
4. Plieninės konstrukcijos, užpildytos betonu su perdirbta guma, gali būti efektyviai taikomos tvarių pastatų statyboje bei infrastruktūroje, ypač ten, kur svarbus konstrukcijų atsparumas dinaminėms apkrovoms, poveikiui gaisrui ar šalčiui.

Šiuo metu mokslinėje literatūroje dauguma darbų remiasi mažo mastelio laboratoriniais bandiniais, kurie ne visada tiksliai atspindi tikrų konstrukcijų elgseną esant realioms apkrovoms, ilgalaikiam poveikiui ir aplinkos veiksniams. Šiuo metu nėra plačiai pritaikytų nacionalinių ar tarptautinių standartų, reglamentuojančių plieninių konstrukcijų su RuC projektavimą, ypač esant ekstremalioms sąlygoms (gaisras, seisminis poveikis, šalčio-atšilimo ciklai). Trūksta tyrimų, kurie vertintų RuC konstrukcijų elgseną per ilgą laikotarpį – atsparumą nuovargiui, karbonatacijai, drėgmei, UV spinduliuotei ir kitoms degradacinėms sąlygoms. Šešiakampiai ar kiti netradiciniai skerspjūviai kol kas mažai ištirti, nors jų geometrija rodo potencialą.

2. Tyrimo metodologija

Planuojamo tyrimo tipas – kiekybinis. Šio tipo tyrimo metodologijos pasirinkimą lemia siekis patikrinti hipotezę, analizuojant eksperimentinius bandymus ir kuriant FEM modelius, aprašančius kolonas su skirtingais geometriniais ir mechaniniais parametrais. Eksperimentų metu sistemaiškai keičiami kolonų geometriniai ir mechaniniai parametrai, kurie daro įtaką kolonų stiprumui, leis nustatyti priklausomybę tarp eksperimentinių ir skaitinės analizės rezultatų.

Tyrimui taikomas kombinuotas metodinis požiūris, apjungiantis literatūros analizę ir skaitinį modeliavimą, siekiant įvertinti plieninių konstrukcijų, užpildytų betonu su gumos priemaisomis, mechanines, fizines ir ilgalaikes eksploatacines savybes. Atliekant kiekybinius tyrimus bus vykdomas modeliavimas ir prognozavimas, taikant kompiuterines programas rezultatų prognozavimui ir įvairių scenarijų analizei. Be to, tyrimo metu bus atliekami ir analitiniai skaičiavimai, skirti kolonų projektavimui.

2.1. Skaičiuojamasis modelis

Remiantis eksperimentinių bandymų rezultatais, sudaromas skaičiuojamasis modelis. Nagrinėjama 3 skirtingų plieno klasių (S235, S275 ir S355) plieniniai profiliai užpildyti skirtingais betono mišiniais: įprasto betono (NC), betono su 5 % gumos (RuC5), betono su 15 % gumos (RuC15). Analizė atlikta naudojant baigtinių elementų (FE) programinę įrangą ANSYS.

2.1.1. Geometrija ir baigtinių elementų modelis

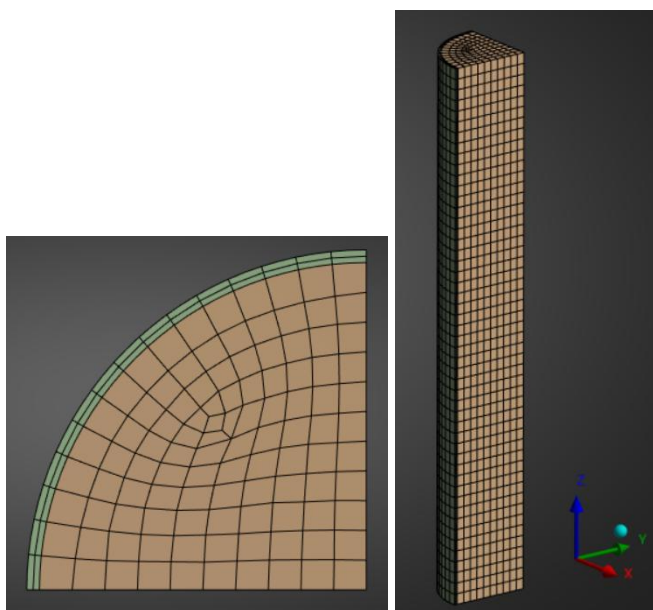
Nagrinėjamų skerspjūvių geometrija, plieno klasė ir betono mišiniai aprašyti 5 lentelėje. Čia pateikiami skerspjūvių išoriniai matmenys: didesnis (B) ir mažesnis (b) kvadratinų skerspjūvių išorinis plotis bei apskrito skerspjūvio kolonų išorinis skersmuo (D). Taip pat lentelėje pateikiamas vamzdžio storis (t), išorinio kampo spindulys (r_e), kolonų aukštis (H).

5 lentelė. CFST ir RuCFST geometrija

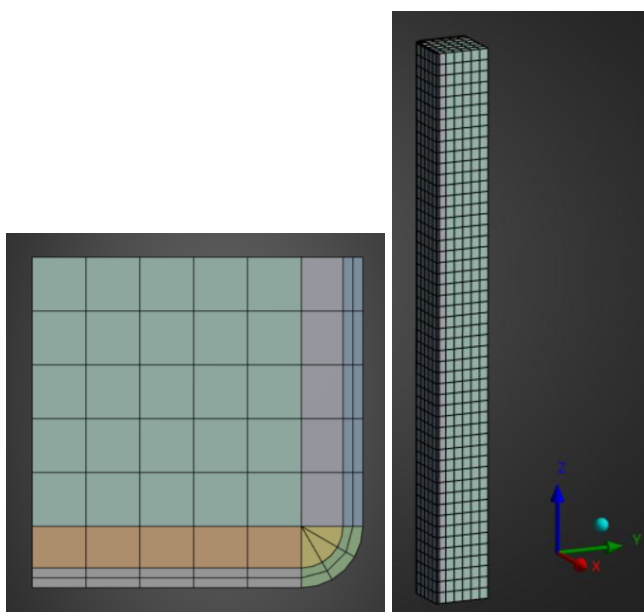
Geometrija	Kolona	B [mm]	b [mm]	D [mm]	t [mm]	r_e [mm]	H [mm]
Apvalus skerspjūvis	C114x3_235_0/5/15	-	-	114	2,70	-	300
	C114x3_275_0/5/15	-	-	114	3,20	-	300
	C152x3_275_0/5/15	-	-	152	2,85	-	500
	C219x4_235_0/5/15	-	-	219	3,85	-	500
	C219x4_355_0/5/15	-	-	219	4,25	-	500
Kvadratinis skerspjūvis	S100x3_235_0/5/15	100	100	-	3,00	9,3	500
	S100x3_355_0/5/15	100	100	-	3,05	5,0	500
	S150x3_235_0/5/15	150	150	-	3,05	5,0	500
	S220x4_235_0/5/15	220	220	-	3,70	8,5	500
	S220x5_355_0/5/15	220	220	-	4,70	12,0	500

2 ir 3 paveikslėliuose pateikti apvalaus ir kvadratinio skerspjūvio kolonų baigtinių elementų modelių geometrijos ir tinklo apžvalga. Projektuojamas ketvirtadalis kiekvieno bandinio pasinaudojant kolonų ir apkrovos simetrija, todėl betoninių ir plieninių dalių mazgai XZ ir YZ simetrijos plokštumose buvo suvaržyti Y ir X ašių kryptimi. Išilgai bandinių aukščio H, tinklas buvo išlaikytas vienodas plieno

ir betono daliai: $H/10$. Išilgai skerspjūvio kontūro, tinkelis išlaikomas pastovus plieninei ir betono daliai: apvalaus skerspjūvio kolonos ketvirtadalis kontūro dalijamas į 15 dalių, o kvadratinio skerspjūvio ketvirtadalis dalijamas į 5 dalis.



2 pav. Baigtinių elementų apvalaus skerspjūvio modelio geometrija ir tinkelis



3 pav. Baigtinių elementų kvadratinio skerspjūvio modelio geometrija ir tinkelis

2.1.2. Medžiagos ir mechaninės savybės

Remiantis atliktų bandymų rezultatais [9] aprašomos plieno mechaninės savybės. 6 lentelėje pateikiamos vidutinės bandymų rezultatų reikšmės: takumo riba f_y , tempimo stipris f_u , tempimo deformacija ε_u . Atitinkamai skaičiuojamajame modelyje panaudotos S235 plieno klasės savybės: $f_y = 284,0 \text{ MPa}$, $f_u = 403,0 \text{ MPa}$, $\varepsilon_u = 0,33$.

6 lentelė. Plieno mechaninės savybės

Plieno klasė	$f_y [MPa]$	$f_u [MPa]$	ε_u
S235	284,0	403,0	0,33
S275	367,7	463,1	0,25
S355	455,5	570,9	0,24

Remiantis atliktų bandymų rezultatais, aprašomos betono mechaninės savybės. Naudojami trys skirtingi betono mišiniai: normalus betonas (NC) ir du betono mišiniai su gumos priemaisomis (RuC). Bandymai atlikti naudojant 5 % ir 15 % gumos (atitinkamai RuC5 ir RuC15). Lentelėje pateikiamos betono mechaninės savybės: gniuždomasis stipris (įvertintas bandant kubelius) f_{cm} ; Jungo modulis E_{cm} , tempiamasis stipris f_{ctm} , betono įtempiai ε_{cm} , Puasono koeficientas ν .

7 lentelė. Betono mechaninės savybės

Betonas	$f_{cm} [MPa]$	$E_{cm} [GPa]$	$f_{ctm} [MPa]$	$\varepsilon_{cm} [\%]$	ν	$f_{c2c} [MPa]$	K_{cm}
NC	49,5	37,6	3,4	0,20	0,20	56,9	0,000683511
RuC5	39,3	33,4	2,6	0,42	0,21	45,6	0,003023353
RuC15	25,2	26,5	2,0	0,54	0,23	29,6	0,004449057

Betono Puasono koeficientas priimamas $\nu_{NC} = 0,20$ [32], gumos Puasono koeficientas priimamas $\nu_{rubber} = 0,50$ [34], o RuC Puasono koeficientas ν_{RuC} randamas remiantis „mišinių taisykle“ [33]. Čia $V_{concrete}$ ir V_{rubber} yra betono matricos ir gumos dalelių tūrinė dalis RuC mišiniuose:

$$\nu_{RuC} = \nu_{NC} V_{concrete} + \nu_{rubber} V_{rubber} \quad 2.1.1$$

8 lentelė. NC, RuC5 ir RuC15 mišinių proporcijos

Betonas	Smulkus užpildas (0,0-4,0 mm)		Stambus užpildas (4,0-22,4 mm)		Padangų užpildas (4,0-11,2 mm)		Vanduo	Cementas
	Tankis [kg/m³]	Kiekis [kg/m³]	Tankis [kg/m³]	Kiekis [kg/m³]	Tankis [kg/m³]	Kiekis [kg/m³]	Kiekis [kg/m³]	Kiekis [kg/m³]
NC	2615,0	802,7	2655,0	1000,3	1150,0	0,0	185,0	350
RuC5		802,7		910,2		39,2	185,0	
RuC15		797,8		727,1		117,1	189,0	

Išsiplėtimo kampas Ψ kontroliuoja plastinio tūrinio deformacijos kiekį, atsirandantį plastinio šlyties metu, ir laikomas pastoviu plastinio takumo metu [35, 36]. Tipinė NC išsiplėtimo kampo vertė, taikoma skaitiniam CFST modeliavimui $\Psi = 20^\circ$, [38,39,37] tačiau RuC Ψ vertė priimta mažesnė nei NC. Youssif ir kt. [40] padarė išvadą, kad RuC išsiplėtimo kampas Ψ yra mažesnis nei NC dėl gumos dalelių gebėjimo (atsižvelgiant į jų hiperelastingumą) užkirsti kelią įtrūkimo plitimui. Duarte ir kt. [34] patvirtino šią išvadą tiek eksperimentiškai, tiek skaitiniu būdu dėl RuC15 bandinio skaldymo tempimo bandymo. Be to, gumos dalelės pasižymi nesuspaudžiamomis savybėmis [14] $\nu_{rubber} \approx 0,50$, o tai taip pat gali prisidėti prie mažesnės RuC išsiplėtimo kampo Ψ vertės, palyginti su NC. Atsižvelgiant į ankstesnius teiginius, eksperimentinių ir skaitinių kreivių pritaikymas lėmė mažesnės RuC išsiplėtimo kampų vertes. Išsiplėtimo kampas Ψ betono mišiniams buvo priimtas,

nepaisant skerspjūvio formos: $\Psi_{NC} = 20^\circ$ normaliam betonui (NC), $\Psi_{RuC5} = 15^\circ$ betonui su 5% gumos (RuC5), $\Psi_{RuC15} = 10^\circ$ betonui su 15% gumos (RuC15).

Aprašant betono mechanines savybes ANSYS, taip pat įvertintas dviašis gniuždymo stipris (f_{ctc}) bei plastinė deformacija, esant vienašiam gniuždymo stipriui (K_{cm}). Aprašomas NC betono mišinys:

$$f_{ctc} = \left(1,2 - \frac{f_{cm}}{1000}\right) f_{cm} = \left(1,2 - \frac{49,5}{1000}\right) \cdot 49,5 = 56,9 \text{ MPa} \quad 2.1.2$$

$$K_{cm} = \varepsilon_{cm} - \frac{f_{cm}}{E_{cm}} = 0,002 - \frac{49,5}{37,6 \cdot 10^3} = 0,000683511 \quad 2.1.3$$

RuC5 ir RuC15 betono mišinių f_{ctc} ir K_{cm} rezultatai pateikti 7 lentelėje.

Kiti baigtinių elementų modelyje priimti parametrai:

- Didžiausia efektyvi plastinė deformacija gniuždant (angl. Ultimate Effective Plastic Strain in Compression) – 0,01;
- Santykinis įtempis netiesinio kietėjimo pradžioje (angl. Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening) – 0,4;
- Liekamasis santykinis gniuždymo įtempis (angl. Residual Compressive Relative Stress) – 0,2;
- Plastinės deformacijos riba tempiant (angl. Plastic Strain Limit in Tension) – 0,01;
- Liekamasis santykinis tempimo įtempis (angl. Residual Tensile Relative Stress) – 0,2.

2.1.3. Apkrovos ir ribinės sąlygos

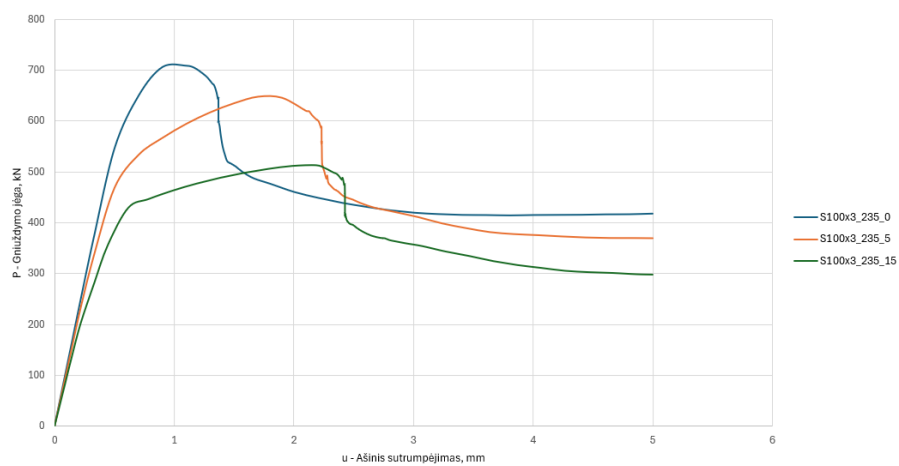
Apkrova kolonomis taikoma taikant nuolat didėjančią išilginį poslinkį išilgai Z ašies. Kolonos apačia įtvirtinta standžiai, o kolonos viršus varžomas dviejų skersinių poslinkių – išilgai X ir Y ašių. Kolonos viršaus ir apačios sukimo poslinkis Z kryptimi taip pat suvaržytas.

Kontaktas tarp plieninių vamzdžių sienelių ir betono ANSYS buvo apibrėžtas kaip kietasis kontaktas. Tai reiškia, kad paviršiai gali atsiskirti, veikiant tempimo jėgoms, bet negali prasiskverbti vienas į kitą. Buvo pritaikytas 0,2 trinties koeficientas nepriklausomai nuo nagrinėjamo betono mišinio. Verta paminėti, kad kaip teigia ir Duarte ir kt. [47] šio parametro įtaka skaitiniams rezultatams yra nereikšminga.

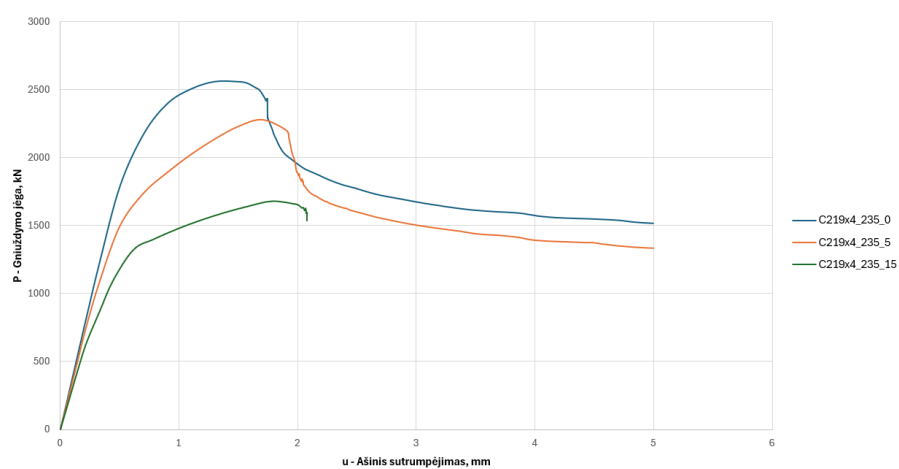
2.1.4. Skaitiniai rezultatai

9 lentelėje pateikiamos literatūroje [8] nagrinėjamų kolonų eksperimentinės ribinės apkrovos $P_{u,Exp}$. Taip pat lentelėje pateikiami šiame darbe atliktų skaitinės analizės su ANSYS skaičiavimų rezultatai: skaitinės ribinės apkrovos $P_{u,Num}$ kartu su santykiu $P_{u,Num}/P_{u,Exp}$ palyginimo tikslais.

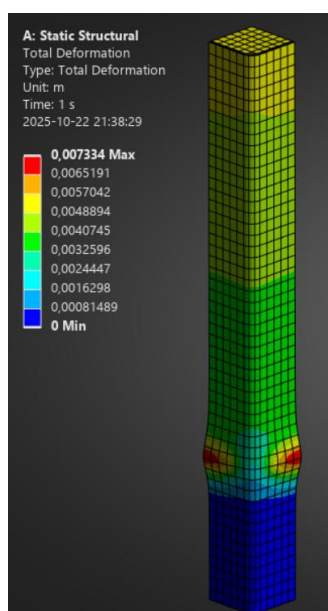
4 paveiksle pavaizduota kvadratinės S100x3_235_0_5_15 kolonos gniuždymo apkrovos (P) ir ašinio sutrumpėjimo (u) kreivė gauta skaitiniu būdu. 5 paveikslėlyje pavaizduota apvalios C219x4_235_0/5/15 kolonos gniuždymo apkrovos (P) ir ašinio sutrumpėjimo (u) kreivė gauta skaitiniu būdu. Kitų kolonų kreivės pateiktos prieduose. 6 paveikslėlyje pavaizduota S100x3_235_15 kolonos deformacija, gauta atlikus skaitinę analizę ir eksperimentinius bandymus.



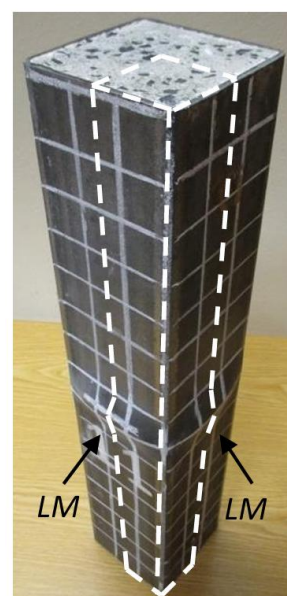
4 pav. Kvadratinės S100x3_235_0_5_15 kolonos P-u kreivė gauta skaitiniu būdu



5 pav. Apvalios C219x4_235_0/5/15 kolonos P-u kreivė gauta skaitiniu būdu



(a)



(b)

6 pav. Kvadratinės S100x3_235_15 kolonos deformacija, gauta atlikus (a) skaitinę analizę ir (b) eksperimentinius bandymus

9 lentelė. Skaitinės analizės kolonų ribinės apkrovos ir palyginimas su eksperimentinėmis ribinėmis apkrovomis.

Geometrija	Betonas	Kolona	$P_{u,Exp}$ (kN) [8]	$P_{u,Num}$ (kN)	$P_{u,Num}/P_{u,Exp}$
Apvalus skerspjūvis	NC	C114x3_235_0	723,1	750,8	1,04
		C114x3_275_0	930,7	844,8	0,91
		C152x3_275_0	1313,7	1329,1	1,01
		C219x4_235_0	2323,5	2562,5	1,10
		C219x4_355_0	2887,7	3088,6	1,07
	Vidurkis:				1,03
	RuC5	C114x3_235_5	597,0	677,9	1,14
		C114x3_275_5	826,3	763,2	0,92
		C152x3_275_5	1107,8	1203,5	1,09
		C219x4_235_5	2197,4	2278,1	1,04
		C219x4_355_5	2603,6	2804,2	1,08
	Vidurkis:				1,05
	RuC15	C114x3_235_15	483,7	518,7	1,07
		C114x3_275_15	673,6	611,5	0,91
		C152x3_275_15	939,7	913,4	0,97
		C219x4_235_15	1814,7	1680,5	0,93
		C219x4_355_15	2244,3	2189,0	0,98
	Vidurkis:				0,97
Kvadratinis skerspjūvis	NC	S100x3_235_0	724,1	708,7	0,98
		S100x3_355_0	851,8	863,6	1,01
		S150x3_235_0	1367,5	1451,1	1,06
		S220x4_235_0	2520,5	3056,5	1,21
		S220x5_355_0	-	3736,0	-
	Vidurkis:				1,07
	RuC5	S100x3_235_5	692,1	648,3	0,94
		S100x3_355_5	805,7	800,9	0,99
		S150x3_235_5	1156,6	1275,2	1,10
		S220x4_235_5	2261,6	2657,6	1,18
		S220x5_355_5	2969,4	3348,6	1,13
	Vidurkis:				1,07
	RuC15	S100x3_235_15	523,0	512,4	0,98
		S100x3_355_15	691,0	665,2	0,96
		S150x3_235_15	824,4	977,4	1,19
		S220x4_235_15	1690,8	1950,0	1,15
		S220x5_355_15	2393,3	2643,5	1,10
	Vidurkis:				1,08

Iš aukščiau šiame skyriuje pateiktos lentelės ir paveikslėlių galima pastebėti, kad skaitiniai rezultatai rodo tą pačią tendenciją, kuri pastebėta ir eksperimentiniuose rezultatuose: RuCFST ašinis stiprumas ir standumas yra mažesnis nei CFST. Skaitiniai rezultatai rodo, kad kai bandinio branduolys yra pakeičiamas iš NC į RuC5 ir RuC15, gniuždomasis stipris vidutiniškai sumažėja 10 % ir 30 %, kai tuo tarpu eksperimentiniai rezultatai rodo kad gniuždomasis stipris vidutiniškai sumažėja 10 % ir 28 %. Taip pat pastebima, kad skaitiniai ($P_{u,Num}$) ir eksperimentiniai ($P_{u,Exp}$) ribiniai stipriai panašūs, tačiau dažnu atveju skaitiniai rezultatai pervertina eksperimentinius ištirtose CFST ir RuCFST kolonose. Vidutinė $P_{u,Num}/P_{u,Exp}$ vertė kvadratinėse NC ir Ru5 kolonose yra 1,07, o Ru15 – 1,08. Vidutinė $P_{u,Num}/P_{u,Exp}$ vertė apvaliose NC kolonose yra 1,03, Ru5 - yra 1,05, o Ru15 – 0,97.

2.2. CFST projektavimas

Išbandytų kolonų maksimalios apkrovos lyginamos su apkrovomis, nustatytomis pagal EC4 [42] supaprastinto projektavimo metodo nuostatas. Šis palyginimas aktualus, norint nustatyti šio standarto tikslumą betono su gumos užpildais atžvilgiu. Prieš vertinant skerspjūvio stiprumą, EC4 [42] reikalauja klasifikuoti skerspjūvius, kas yra svarbu numatant plieninių vamzdžių vietinio išlinkimo įtaką.

2.2.1. Skerspjūvio klasifikacija

EC4 [42] nurodoma, kad projektuojant galima neatsižvelgti į vietinį plieninio vamzdžio išlinkimą CFST kolonose, jei neviršijamos toliau pateiktos geometrinės vietinio liaunumo ribos (λ_L). Skaičiuojama skerspjūvio klasė C114x3_235_0 ir S100x3_235_0 kolonoms

Apskrito skerspjūvio kolonoms:

$$\lambda_L = \frac{D}{t} = \frac{114}{2,7} = 42,2 \quad 2.2.1$$

Kvadratinio skerspjūvio kolonoms

$$\lambda_L = \frac{B}{t} = \frac{100}{3} = 33,3 \quad 2.2.2$$

Tad skerspjūvis priklauso 4 klasei, jei tenkinamos šios sąlygos:

$$\begin{cases} \frac{\lambda_L}{90\varepsilon^2} \geq 1 \\ \frac{\lambda_L}{52\varepsilon} \geq 1 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{apskritam skerspjūviui} \\ \text{kvadratiniam skerspjūviui} \end{matrix} \quad 2.2.3$$

Šiose formulėse:

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \right)^{0,5} = \left(\frac{235}{235} \right)^{0,5} = 1 \quad 2.2.4$$

Patikrinamos sąlygos:

$$\begin{cases} \frac{\lambda_L}{90\varepsilon^2} = \frac{42,2}{90 \cdot 1^2} = 0,47 < 1 \\ \frac{\lambda_L}{52\varepsilon} = \frac{33,3}{52 \cdot 1} = 0,64 < 1 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Skerspjūvis nepriklauso 4 klasei} \\ \text{Skerspjūvis nepriklauso 4 klasei} \end{array} \quad 2.2.5$$

Iš aukščiau pateiktų formulių matyti, kad prognozuojant kolonos maksimalią apkrovą, reikia atsižvelgti į vietinį išlinkimą. Apskrito skerspjūvio kolonomis EC3 [31] ir EC4 [42] nustatytos 4 klasės klasifikacijos ribos yra vienodos. Kvadratinio skerspjūvio kolonomis šios ribos skiriasi. 4 klasės riba yra 42ε plieniniams profiliams be betono ir 52ε plieniniams profiliams užpildytiems betonu. Antroji yra aukštesnė ir konservatyvesnė nei pirmoji, nes joje atsižvelgiama į betono šerdies apribojimą vietiniam plieninio vamzdžio išlinkimui.

10 lentelėje pateikiamos skerspjūvio klasifikacijos pagal EC4 [42] nagrinėjamos kolonomis. Lentelėje matoma kad beveik pusė skerspjūvių klasifikuojama kaip 4 klasės skerspjūviai, todėl vertinant jų stiprumą, reikia atsižvelgti į vietinį išlinkimą. Vietinio išlinkimo poveikis vertinamas atsižvelgiant į skirtingas skerspjūvio formas.

10 lentelė. Skerspjūvio klasifikacija pagal EC4

Geometrija	Kolona	λ_L	f_y [MPa]	ε	$90\varepsilon^2$	52ε	$\frac{\lambda_L}{90\varepsilon^2}$	$\frac{\lambda_L}{52\varepsilon}$	Ar skerspjūvis yra 4 klasės?
Apvalus skerspjūvis	C114x3_235_0/5/15	42,2	284,0	0,91	74,47	-	0,57	-	NE
	C114x3_275_0/5/15	35,6	367,7	0,80	57,52	-	0,62	-	NE
	C152x3_275_0/5/15	53,3	367,7	0,80	57,52	-	0,93	-	NE
	C219x4_235_0/5/15	56,9	284,0	0,91	74,47	-	0,76	-	NE
	C219x4_355_0/5/15	51,5	455,5	0,72	46,43	-	1,11	-	TAIP
Kvadratinis skerspjūvis	S100x3_235_0/5/15	33,3	284,0	0,91	-	47,30	-	0,70	NE
	S100x3_355_0/5/15	32,8	455,5	0,72	-	37,35	-	0,88	NE
	S150x3_235_0/5/15	49,2	284,0	0,91	-	47,30	-	1,04	TAIP
	S220x4_235_0/5/15	59,5	284,0	0,91	-	47,30	-	1,26	TAIP
	S220x5_355_0/5/15	46,8	455,5	0,72	-	37,35	-	1,25	TAIP

2.2.2. Apvalaus skerspjūvio kolonų stiprumas

Toliau šiame skyriuje nustatomas C114x3_235_0 kolonos skerspjūvio stiprumas.

Apvalaus kolonų skerspjūvio maksimali apkrova įvertinama pagal EC4 [42]:

$$P_{u,EC4} = \eta_a N_{steel} + A_{concrete} f_{cm,cyl} \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_{cm,cyl}} \right) \quad 2.2.6$$

čia N_{steel} yra ašinis plieninio profilio stiprumas, $A_{concrete}$ yra betono branduolio plotas, o $f_{cm,cyl}$ yra betono ekvivalentinis cilindrinis gniuždymo stipris randamas pagal formulę [41]:

$$f_{cm,cyl} = \left[0,76 + 0,2 \log_{10} \left(\frac{f_{cm}}{19,6} \right) \right] f_{cm} \quad 2.2.7$$

$$f_{cm,cyl} = \left[0,76 + 0,2 \log_{10} \left(\frac{49,5}{19,6} \right) \right] \cdot 49,5 = 41,6 \text{ MPa}$$

Koeficientai η_a ir η_c atitinkamai atspindi plieninio vamzdžio takumo įtempio sumažėjimą ir betono branduolio gniuždymo stiprio padidėjimą dėl jų sąveikos kontakto būdu:

$$\eta_a = 0,25(3 + 2\lambda_G) = 0,25 \cdot (3 + 2 \cdot 0,12) = 0,81 < 1,0 \quad 2.2.8$$

$$\eta_c = 4,9 - 18,5\lambda_G + 17\lambda_G^2 = 4,9 - 18,5 \cdot 0,12 + 17 \cdot 0,12^2 = 2,95 > 0 \quad 2.2.9$$

Aukščiau pateiktoje formulėje λ_G yra bendras kolonos išlinkimo lieknumas, kur N_{pl} ir N_{cr} yra kolonos plastinė ir kritinė apkrovos:

$$\lambda_G = \left(\frac{N_{pl}}{N_{cr}} \right)^{0,5} = 0,12 \quad 2.2.10$$

Apskrito skerspjūvio vamzdžiai nepasižymi stiprumu po išlinkimo, todėl yra gana jautrūs defektams. Dėl standesnių zonų nebuvimo, kaip kvadratinių skerspjūvių kampų atveju, visas apskritas skerspjūvis lokaliai išlinksta. Taigi, jei skerspjūvis yra 4 klasės, apskrito skerspjūvio vamzdžių plastinis stipris sumažėja koeficientu χ_l , kuris atsižvelgia į geometrinius netiesinius efektus. Todėl plieninių vamzdžių su apskritu skerspjūviu skerspjūvio stipris gniuždant pateiktas EC3 [31]:

$$N_{steel} = \begin{cases} \chi_l A_{steel} f_y & 4 \text{ klasės skerspjūviams} \\ A_{steel} f_y & 1,2,3 \text{ klasės skerspjūviams} \end{cases} \quad 2.2.11$$

Kaip jau nustatyta anksčiau C114x3_235_0 kolona nepriklauso 4 klasei, tad N_{steel} :

$$N_{steel} = A_{steel} f_y = 944,1 \cdot 284 = 268124 \text{ N} = 268,1 \text{ kN} \quad 2.2.12$$

Jei skerspjūvis yra 4 klasės, tai norint rasti N_{steel} atitinkamai reikia apskaičiuoti parametrus aprašytus žemiau (žr. 2.2.13-2.2.20 formules).

Sumažinimo koeficiento apskaičiavimo lygtis:

$$\chi_l = \begin{cases} 1 & \text{jei } \lambda_s \leq 0,2 \\ 1 - 0,6 \left(\frac{\lambda_s - 0,2}{\lambda_{pl} - 0,2} \right) & \text{jei } 0,2 < \lambda_s < \lambda_{pl} \\ \frac{a'}{\lambda_s^2} & \text{jei } \lambda_s \geq \lambda_{pl} \end{cases} \quad 2.2.13$$

Sumažinimo koeficientas priklauso nuo vamzdžio plonumo λ_s ir ribos tarp elastinio lūžio λ_{pl} :

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad 2.2.14$$

$$\lambda_{pl} = \sqrt{\frac{a'}{0,4}} \quad 2.2.15$$

Apskaičiuojamas netobulumo faktorius a' pagal formulę:

$$a' = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{\Delta w_k}{t} \right)^{1,44}} \quad 2.2.16$$

čia charakteristinė netobulumo amplitudės vertė Δw_k , kuri priklauso nuo gamybos kokybės parametro Q , čia imamo kaip $Q = 25$ (aukšta gamybos kokybė), ir nuo apskrito skerspjūvio vidurio paviršiaus spindulio r_m ir storio t :

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r_m}{t}} t \quad 2.2.17$$

Norint nustatyti vamzdžio plonumą, vamzdžio tamprusis kritinis išlinkimo įtempis σ_{cr} apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$\sigma_{cr} = 0,605 E_{steel} C_x \frac{t}{r_m} \quad 2.2.18$$

čia E_{steel} yra plieno Jungo modulis, o C_x parametras, kuris priklauso nuo vamzdžio atramų, t. y. jis kinta priklausomai nuo kraštinių sąlygų tipo ir savo kraštinių santykio, žymimo bemačiu ilgio parametru:

$$\omega' = \frac{H}{\sqrt{r_m t}} \quad 2.2.19$$

čia H yra bendras vamzdžio aukštis. Pagal EC3 [31] priklausomai nuo ω' vertės, vamzdis gali būti klasifikuojamas kaip trumpas, vidutinio ilgio ir ilgas:

$$C_x = \begin{cases} 1,36 - \frac{1,83}{\omega'} + \frac{2,07}{\omega'^2} & \text{jei } \omega' \leq 1,7 \text{ (trumpas)} \\ 1,0 & \text{jei } 1,7 < \omega' \leq \frac{r_m}{2t} \text{ (vidutinio ilgio)} \\ \max \left\{ 0,6; 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[1 - 2\omega' \frac{t}{r_m} \right] \right\} & \text{jei } \omega' > \frac{r_m}{2t} \text{ (ilgas)} \end{cases} \quad 2.2.20$$

čia C_{xb} yra parametras, kuris atsižvelgia į vamzdžio ribines (atramines) sąlygas. Pagal EC3 [X] ribinė sąlyga „BC2“ (be inkaravimo) taikoma abiem bandomųjų kolonų galams, todėl $C_{xb} = 1$.

Įvertinama apvalios kolonos C114x3_235_0 maksimali apkrova:

$$P_{u,EC4} = \eta_a N_{steel} + A_{concrete} f_{cm,cyl} \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_{cm,cyl}} \right) \quad 2.2.21$$

$$P_{u,EC4} = 0,81 \cdot 268124 + 9263 \cdot 41,6 \cdot \left(1 + 2,95 \cdot \frac{2,7}{114} \cdot \frac{284}{41,6} \right) = 786324 \text{ N} \\ = 786,3 \text{ kN}$$

Kitų apvalaus skerspjūvio kolonų maksimalios apkrovos pateikiamos 2.2.4 skyriuje.

2.2.3. Kvadratinio skerspjūvio kolonų stiprumas

Kvadratinų kolonų skerspjūvio maksimali apkrova įvertinama pagal EC4 [42]:

$$P_{u,EC4} = N_{steel} + A_{concrete} f_{cm,cyl} \quad 2.2.22$$

Aukščiau pateiktoje formulėje parametrų reikšmės paaiškintos ankstesniame skyriuje.

Kaip matyti ankstesniame skyriuje, apskrito skerspjūvio vamzdžiai daug labiau priglunda prie betono branduolio (taigi, padidina gniuždymo stiprį) nei kvadratiniai skerspjūviai, o tai yra natūrali jų sukimosi simetrijos pasekmė. Tai paaiškina koeficientų η_a ir η_c nebuvimą $P_{u,EC4}$ lygtyje kvadratiniams skerspjūviams.

Skirtingai nei apskrito skerspjūvio vamzdžiai, kvadratiniai įgyja stiprumą po išlinkimo, yra nejautrūs pradiniais defektams ir pasižymi didesniu standumu kampuose, palyginti su centrine sienelių dalimi. Todėl vietoj mažinimo koeficiento taikomas efektyvus ploto metodas, „pašalinant“ silpnesnę vamzdžių sienelių dalį (centrinę zoną), o ne kampines zonas. Taigi, plieninio vamzdžio ašinis stiprumas pateikiamas pagal EC3 [31]:

$$N_{steel} = \begin{cases} A_{steel,eff} f_y & 4 \text{ klasės skerspjūviams} \\ A_{steel} f_y & 1,2,3 \text{ klasės skerspjūviams} \end{cases} \quad 2.2.23$$

čia formulėje $A_{steel,eff}$ ir A_{steel} yra plieninio vamzdžio efektyvusis ir bendras plotas. Efektyvusis plotas įvertinamas vamzdžio sienelių plotį padauginus iš redukcijos koeficientų (ρ_{eff}), kurie priklauso nuo sienelių vietinio lieknumo ir gniuždymo įtempių pasiskirstymo, visi nustatyti pagal EC3 [31].

Įvertinama kvadratinės kolonos S100x3_235_0 maksimali apkrova. Nustatomas ašinis plieninio profilio stiprumas N_{steel} . Kadangi kaip jau nustatyta anksčiau skerspjūvis nėra 4 klasės, nustatoma pagal formulę:

$$N_{steel} = A_{steel} f_y = 1123,8 \cdot 284 = 319159 \text{ N} = 319,1 \text{ kN} \quad 2.2.24$$

Betono ekvivalentinis cilindrinis gniuždymo stipris $f_{cm,cyl}$:

$$f_{cm,cyl} = \left[0,76 + 0,2 \log_{10} \left(\frac{f_{cm}}{19,6} \right) \right] f_{cm} \quad 2.2.25$$

$$f_{cm,cyl} = \left[0,76 + 0,2 \log_{10} \left(\frac{49,5}{19,6} \right) \right] \cdot 49,5 = 41,6 \text{ MPa}$$

Įvertinama kvadratinės kolonos S100x3_235_0 maksimali apkrova:

$$P_{u,EC4} = N_{steel} + A_{concrete}f_{cm,cyl} \quad 2.2.26$$

$$P_{u,EC4} = 319159 + 8802 \cdot 41,6 = 685322 \text{ N} = 685,3 \text{ kN}$$

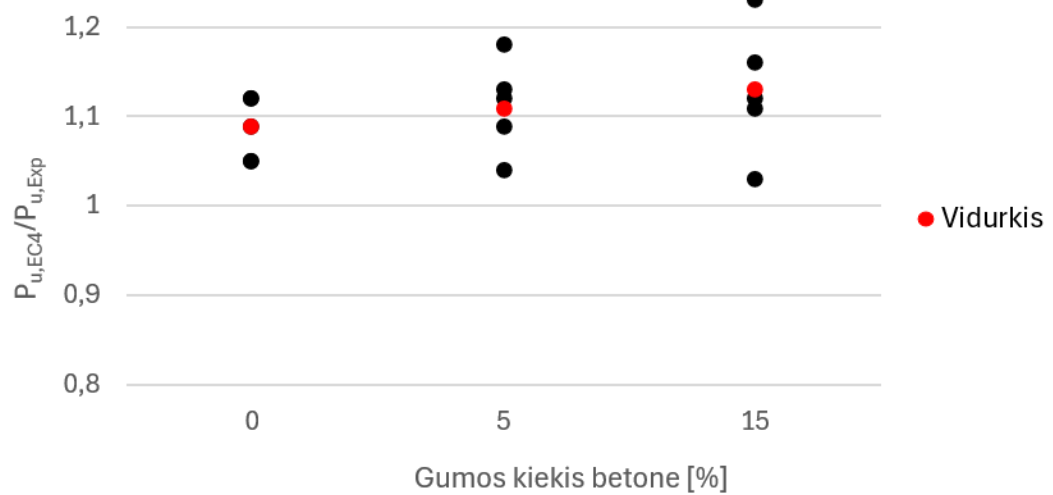
Kitų kvadratinio skerspjūvio kolonų maksimalios apkrovos pateikiamos 2.2.4 skyriuje.

2.2.4. Prognozuojamos maksimalių apkrovų vertės pagal EC4

Pagal ankstesniuose skyriuose aprašytas formules galima aprašyti ribinių apkrovų vertes pagal EC4 ($P_{u,EC4}$). Maksimali apkrova apvalaus skerspjūvio kolonomis įgverinama pagal 2.2.6 formulę, o kvadratinio skerspjūvio kolonų – 2.2.22 formulę. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 11 ir 12 lentelėse.

11 lentelė. Prognozuojama apvalių kolonų ribinė apkrova pagal EC4

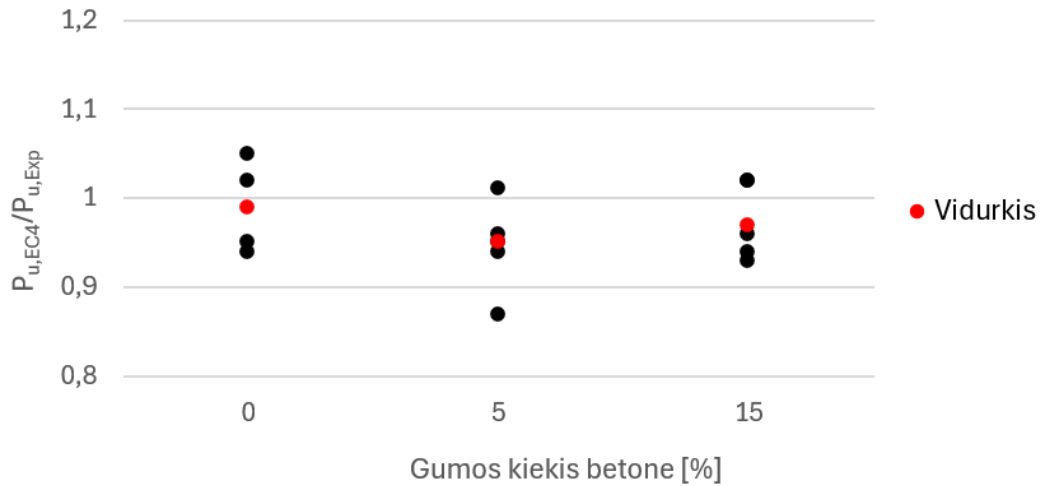
Kolona	$A_{concrete}$ (mm ²)	A_{steel} (mm ²)	λ_s	χ_l	λ_G	$f_{cm,cyl}$ (MPa)	η_a	η_c	$P_{u,EC4}$ (kN)	$P_{u,Exp}$ (kN) [8]	$P_{u,EC4}$ / $P_{u,Exp}$
C114x3_235_0	9263,0	944,1	-	-	0,12	41,6	0,81	2,95	786,3	723,1	1,09
C114x3_275_0	9093,2	1113,9	-	-	0,12	41,6	0,81	2,87	980,6	930,7	1,05
C152x3_275_0	16810,4	1335,4	-	-	0,16	41,6	0,82	2,40	1384,8	1313,7	1,05
C219x4_235_0	35066,2	2062,3	-	-	0,11	41,6	0,80	3,14	2601,9	2323,5	1,12
C219x4_355_0	34801,2	2867,3	0,35	0,90	0,11	41,6	0,81	3,03	3246,1	2887,7	1,12
Vidurkis:										1,09	
C114x3_235_5	9263,0	944,1	-	-	0,11	32,2	0,81	3,04	703,7	597,0	1,18
C114x3_275_5	9093,2	1113,9	-	-	0,12	32,2	0,81	2,94	900,6	826,3	1,09
C152x3_275_5	16810,4	1335,4	-	-	0,15	32,2	0,83	2,49	1236,2	1107,8	1,12
C219x4_235_5	35066,2	2062,3	-	-	0,10	32,2	0,80	3,23	2285,3	2197,4	1,04
C219x4_355_5	34801,2	2867,3	0,35	0,90	0,11	32,2	0,80	3,10	2935,3	2603,6	1,13
Vidurkis:										1,11	
C114x3_235_15	9263,0	944,1	-	-	0,10	19,7	0,81	3,16	594,7	483,7	1,23
C114x3_275_15	9093,2	1113,9	-	-	0,11	19,7	0,81	3,03	794,7	673,6	1,16
C152x3_275_15	16810,4	1335,4	-	-	0,14	19,7	0,83	2,63	1039,8	939,7	1,11
C219x4_235_15	35066,2	2062,3	-	-	0,09	19,7	0,80	3,36	1866,5	1814,7	1,03
C219x4_355_15	34801,2	2867,3	0,35	0,90	0,10	19,7	0,80	3,20	2523,9	2244,3	1,12
Vidurkis:										1,13	



7 pav. Apvalaus skerspjūvio $P_{u,EC4}/P_{u,Exp}$ grafikas

12 lentelė. Prognozuojama kvadratinių kolonų ribinė apkrova pagal EC4

Kolona	$A_{concrete}$ (mm^2)	A_{steel} (mm^2)	λ_p	ρ_{eff}	$f_{cm,cyl}$ (MPa)	$A_{steel,eff}$ (mm^2)	$P_{u,EC4}$ (kN)	$P_{u,Exp}$ (kN) [8]	$P_{u,EC4}/P_{u,Exp}$
S100x3_235_0	8802	1123,8	-	-	41,6	-	685,3	724,1	0,95
S100x3_355_0	8814	1164,6	-	-	41,6	-	894,6	851,8	1,05
S150x3_235_0	20704	1774,6	0,89	0,85	41,6	1513,1	1291,0	1367,5	0,94
S220x4_235_0	45179	3159,0	1,06	0,75	41,6	2397,8	2560,4	2520,5	1,02
S220x5_355_0	44307	3969,8	1,02	0,77	41,6	3112,9	3262,6	-	-
Vidurkis:									0,99
S100x3_235_5	8802	1123,8	-	-	32,2	-	602,6	692,1	0,87
S100x3_355_5	8814	1164,6	-	-	32,2	-	813,2	805,7	1,01
S150x3_235_5	20704	1774,6	0,89	0,85	32,2	1513,1	1096,4	1156,6	0,95
S220x4_235_5	45179	3159,0	1,06	0,75	32,2	2397,8	2135,7	2261,6	0,94
S220x5_355_5	44307	3969,8	1,02	0,77	32,2	3112,9	2846,2	2969,4	0,96
Vidurkis:									0,95
S100x3_235_15	8802	1123,8	-	-	19,7	-	492,6	523,0	0,94
S100x3_355_15	8814	1164,6	-	-	19,7	-	704,7	691,0	1,02
S150x3_235_15	20704	1774,6	0,89	0,85	19,7	1513,1	837,6	824,4	1,02
S220x4_235_15	45179	3159,0	1,06	0,75	19,7	2397,8	1571,0	1690,8	0,93
S220x5_355_15	44307	3969,8	1,02	0,77	19,7	3112,9	2292,3	2393,3	0,96
Vidurkis:									0,97



8 pav. Kvadratinio skerspjuvio $P_{u,EC4}/P_{u,Exp}$ grafikas

12 lentelėje galima matyti, EC4 prognozuoja ir pateikia konservatyvų kvadratinių kolonų ribinę apkrova skaičiavimą. Tuo tarpu iš 11 lentelės galima matyti, kad apvalaus skerspjuvio maksimali apkrova pagal EC4 yra nekonservatyvi - $P_{u,EC4}/P_{u,Exp}$ vidurkis lygus 1,11. Kitų autorių atliktuose tyrimuose ši reikšmė vyrauja tarp 1,07 ir 1,12 [38]. Prognozuojamas ribinis stipris yra mažiau konservatyvus, didėjant gumos procento kiekiui betone, todėl EC4 pervertina tokio betono stiprį ir prisideda prie nesaugių prognozių. Kad to išvengti siūlomi koeficientai, kurie $P_{u,EC4}/P_{u,Exp}$ reikšmę paverstų lygią 1,00 arba artimą jai.

Apriboto betono stipris f_{cc} apskaičiuojamas pagal formulę [43]:

$$f_{cc} = f_{cm,cyl} + k_1 f_l \quad 2.2.27$$

čia k_1 yra koeficientas, kuris pasak literatūros paprastai vyrauja nuo $k_1 = 4,7$ iki $k_1 = 7,0$ [44,45], kur didesnė reikšmė priimama, kai f_l yra mažesnis. A. Duarte ir kt. [8] nustatė, kad šios reikšmės atitinkamai NC, RuC5 ir RuC15 gali būti $k_1 = 3,9$, $k_1 = 3,6$, $k_1 = 4,0$. Šios reikšmės labai panašios į tas, kurias siūlo ir FE. Richart. ir kt. [44].

Perrašius anksčiau aprašytos apvalaus kolonų skerspjuvio maksimalios apkrovos įvertinimo pagal EC4 formulės (2.2.6 formulė) antrą dalį gaunama kad:

$$f_{cm,cyl} \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_{cm,cyl}} \right) = f_{cm,cyl} + \eta_c f_y \frac{1}{\left(\frac{D}{t} \right)} \quad 2.2.28$$

Lyginant 2.2.27 ir 2.2.28 formules pastebimas ryšys: $\eta_c = k_1$ ir $f_y/(D/t) = f_l$. Taip pat pastebima, kad η_c reikšmės nustatytos pagal EC4 (žr. 11 lentelę) yra mažesnės nei k_1 , tai reiškia, kad didelė pervertinimo dalis susijusi su $f_y/(D/t) = f_l$ dalimi.

Jei mažesnė f_l reikšmė atsiranda betone, tuomet keičiasi ir įtempiai plieniniame profilyje (σ_h) [46]:

$$\sigma_h = \frac{f_l D_m}{2t} = \frac{2,64 \cdot (114 - 2,7)}{2 \cdot 2,7} = 54,4 \quad 2.2.29$$

čia $D_m = D - t$ yra vamzdžio vidurio paviršiaus skersmuo. Tai reiškia, kad anksčiau aprašyta η_a lygtis gali būti netiksliai įvertinta. Atsižvelgiant į šiuos veiksnius, perskaičiuojamos apskrito skerspjūvio kolonų apkrovos, naudojant modifikuotas η_a ir η_c vertes, žymimas η'_a ir η'_c . Šiuo atveju priimame, kad $k_1 = \eta'_c = 4,1$. η'_a galima įvertinti pagal formulę:

$$\eta'_a = \left| \frac{\sigma_h}{2f_y} - \sqrt{1 - \frac{3\sigma_h^2}{4f_y^2}} \right| = \left| \frac{54,4}{2 \cdot 284} - \sqrt{1 - \frac{3 \cdot 54,4^2}{4 \cdot 284^2}} \right| = 0,89 \quad 2.2.30$$

Bendroji lygtis betono ribojimo slėgiui nustatyti:

$$f_l = 4,5f_y \left[\frac{0,5 - p_{RA}}{750} + \frac{2,5 - 4,7p_{RA}}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right] \quad 2.2.31$$

$$f_l = 4,5 \cdot 284 \cdot \left[\frac{0,5 - 0}{750} + \frac{2,5 - 4,7 \cdot 0}{\left(\frac{114}{2,7}\right)^2} \right] = 2,64 \text{ MPa}$$

čia p_{RA} priimama pagal betono mišinį: $p_{RA,NC} = 0$, $p_{RA,RuC5} = 0,05$, $p_{RA,RuC15} = 0,15$.

Perrašoma formulė ir įvertinama apvalios kolonos C114x3_235_0 maksimali apkrova:

$$P_{u,Est} = \eta'_a N_{steel} + A_{concrete} (f_{cm,cyl} + \eta'_c f_l) \quad 2.2.32$$

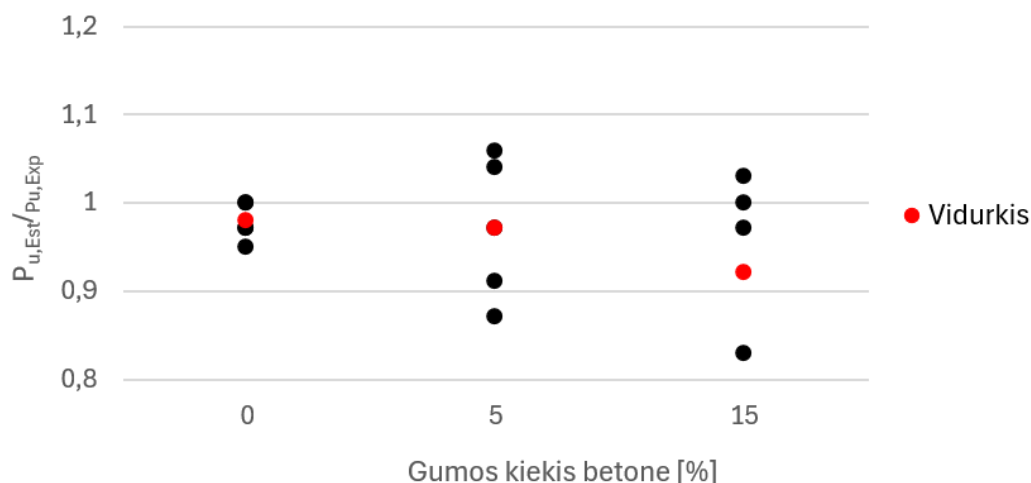
$$P_{u,Est} = 0,89 \cdot 268124 + 9263 \cdot (41,6 + 4,1 \cdot 2,64) = 724234 \text{ N} = 724,2 \text{ kN}$$

Kitų apvalių kolonų patikslinti ribiniai stipriai ($P_{u,Est}$) pateikti 13 lentelėje.

13 lentelė. Prognozuojama apvalių kolonų ribinė apkrova pagal EC4 su alternatyviomis reikšmėmis

Kolona	$A_{concrete}$ (mm ²)	A_{steel} (mm ²)	λ_s	χ_l	λ_G	η'_a	η'_c	f_l [MPa]	$P_{u,Est}$ (kN)	$P_{u,Exp}$ (kN) [8]	$P_{u,Est}$ / $P_{u,Exp}$
C114x3_235_0	9263,0	944,1	-	-	0,12	0,89	4,1	2,64	724,2	723,1	1,00
C114x3_275_0	9093,2	1113,9	-	-	0,12	0,88	4,1	4,37	901,6	930,7	0,97
C152x3_275_0	16810,4	1335,4	-	-	0,16	0,90	4,1	2,56	1317,7	1313,7	1,00
C219x4_235_0	35066,2	2062,3	-	-	0,11	0,90	4,1	1,84	2250,4	2323,5	0,97
C219x4_355_0	34801,2	2867,3	0,35	0,90	0,11	0,90	4,1	3,30	2739,0	2887,7	0,95
Vidurkis:											0,98
C114x3_235_5	9263,0	944,1	-	-	0,11	0,90	4,1	2,39	630,3	597,0	1,06
C114x3_275_5	9093,2	1113,9	-	-	0,12	0,89	4,1	3,95	804,6	826,3	0,97
C152x3_275_5	16810,4	1335,4	-	-	0,15	0,91	4,1	2,31	1147,3	1107,8	1,04
C219x4_235_5	35066,2	2062,3	-	-	0,10	0,91	4,1	1,66	1900,8	2197,4	0,87
C219x4_355_5	34801,2	2867,3	0,35	0,90	0,11	0,91	4,1	2,98	2375,3	2603,6	0,91
Vidurkis:											0,97
C114x3_235_15	9263,0	944,1	-	-	0,10	0,92	4,1	1,88	500,6	483,7	1,03

C114x3_275_15	9093,2	1113,9	-	-	0,11	0,92	4,1	3,11	671,9	673,6	1,00
C152x3_275_15	16810,4	1335,4	-	-	0,14	0,93	4,1	1,82	913,3	939,7	0,97
C219x4_235_15	35066,2	2062,3	-	-	0,09	0,93	4,1	1,31	1423,8	1814,7	0,78
C219x4_355_15	34801,2	2867,3	0,35	0,90	0,10	0,93	4,1	2,34	1867,2	2244,3	0,83
Vidurkis:											0,92



9 pav. Apvalaus skerspjuvio $P_{u,Est}/P_{u,Exp}$ grafikas

11 ir 13 lentelėse galima matyti kad $P_{u,Est}/P_{u,Exp}$ vidutinė reikšmė yra $P_{u,Est}/P_{u,Exp} = 0,96$, kuri yra mažesnė už 1,0 bet artimesnė nei $P_{u,EC4}/P_{u,Exp} = 1,11$. Dabar prognozuojamos apvalaus skerspjuvio maksimali apkrova pagal EC4 yra konservatyvi.

2.3. Tyrimo rezultatai

Šio skyrelio lentelėse pateikiamos eksperimentinės ribinės kolonų apkrovos ($P_{u,Exp}$), skaitinės ribinės kolonų apkrovos ($P_{u,Num}$), ribinės kolonų apkrovos pagal EC4 skaičiavimo metodiką ($P_{u,EC4}$) ir patikslinto EC4 skaičiavimo metodikos ribinės kolonų apkrovos ($P_{u,Est}$).

Kaip jau minėta anksčiau, skaitinių skaičiavimų rezultatai patvirtina tą pačią tendenciją, kuri nustatyta ir eksperimentinių tyrimų metu – RuCFST kolonų ašinis stiprumas ir standumas yra mažesni lyginant su CFST. Skaitinė analizė parodė, kad pakeitus bandinio branduolio medžiagą iš įprasto betono (NC) į RuC5 ir RuC15, gniuždomasis stipris vidutiniškai sumažėja atitinkamai apie 10 % ir 30 %, tuo tarpu eksperimentiniai duomenys rodo analogišką sumažėjimą – apie 10 % ir 28 %. Be to, nustatyta, kad skaitiniai ribiniai stipriai ($P_{u,Num}$) yra artimi eksperimentiniu būdu gautiems ribiniams stipriams ($P_{u,Exp}$), tačiau daugeliu atvejų skaitiniai modeliai linkę šiek tiek pervertinti faktinius rezultatus tiek CFST, tiek RuCFST kolonomis. Vidutinė $P_{u,Num}/P_{u,Exp}$ santykio reikšmė kvadratinio skerspjuvio NC ir Ru5 kolonomis siekia 1,07, o Ru15 kolonomis – 1,08. Tuo tarpu apvalaus skerspjuvio NC kolonomis ši vidutinė reikšmė yra 1,03, Ru5 kolonomis – 1,05, o Ru15 kolonomis – 0,97.

Duomenys rodo, kad EC4 metodika kvadratinio skerspjuvio kolonomis prognozuoja ribinę apkrovą konservatyviai. Tuo tarpu apvalaus skerspjuvio kolonų atveju pagal EC4 apskaičiuota maksimali apkrova yra nekonservatyvi – vidutinė santykio $P_{u,EC4}/P_{u,Exp}$ reikšmė siekia 1,11. Didėjant gumos

kiekiui betono mišinys, prognozuojamas ribinis stipris tampa vis mažiau konservatyvus, todėl EC4 metodas pervertina tokio betono laikomąją galią ir gali lemti nesaugias prognozes. Siekiant to išvengti, pritaikomi korekciniai koeficientai, kurie leidžia $P_{u,EC4}/P_{u,Exp}$ santykį sumažinti iki 1,00 arba kuo artimesnės šiai reikšmės. Lentelėse galima matyti kad $P_{u,Est}/P_{u,Exp}$ vidutinė reikšmė yra $P_{u,Est}/P_{u,Exp} = 0,96$, kuri yra mažesnė už 1,0 bet artimesnė nei $P_{u,EC4}/P_{u,Exp} = 1,11$.

Taip pat atliktas palyginimas tarp skaitinių ribinių apkrovų ir ribinių apkrovų apskaičiuotų pagal EC4. Čia galima matyti, kad kaip ir lyginant eksperimentines reikšmes su EC4 skaičiavimais, apvalaus kolonų ribinės apkrovos yra pervertintos, o kvadratinio skerspjūvio – nuvertintos. Lentelėje matyti, kad $P_{u,EC4}/P_{u,Num}$ santykio kvadratinio skerspjūvio NC kolonomis siekia 0,92, Ru5 kolonomis – 0,89 o Ru15 kolonomis – 0,91. Tuo tarpu apvalaus skerspjūvio NC ir Ru5 kolonomis ši vidutinė reikšmė yra 1,06, o Ru15 kolonomis – 1,17.

14 lentelė. Apvalių kolonų ribinės apkrovos

Kolona	$P_{u,Exp}$ (kN) [8]	$P_{u,Num}$ (kN)	$P_{u,EC4}$ (kN)	$P_{u,Est}$ (kN)	$P_{u,Num}$ / $P_{u,Exp}$	$P_{u,EC4}$ / $P_{u,Exp}$	$P_{u,EC4}$ / $P_{u,Num}$	$P_{u,Est}$ / $P_{u,Exp}$
C114x3_235_0	723,1	750,8	786,3	724,2	1,04	1,09	1,05	1,00
C114x3_275_0	930,7	844,8	980,6	901,6	0,91	1,05	1,16	0,97
C152x3_275_0	1313,7	1329,1	1384,8	1317,7	1,01	1,05	1,04	1,00
C219x4_235_0	2323,5	2562,5	2601,9	2250,4	1,10	1,12	1,02	0,97
C219x4_355_0	2887,7	3088,6	3246,1	2739,0	1,07	1,12	1,05	0,95
Vidurkis:					1,03	1,09	1,06	0,98
C114x3_235_5	597,0	677,9	703,7	630,3	1,14	1,18	1,04	1,06
C114x3_275_5	826,3	763,2	900,6	804,6	0,92	1,09	1,18	0,97
C152x3_275_5	1107,8	1203,5	1236,2	1147,3	1,09	1,12	1,03	1,04
C219x4_235_5	2197,4	2278,1	2285,3	1900,8	1,04	1,04	1,00	0,87
C219x4_355_5	2603,6	2804,2	2935,3	2375,3	1,08	1,13	1,05	0,91
Vidurkis:					1,05	1,11	1,06	0,97
C114x3_235_15	483,7	518,7	594,7	500,6	1,07	1,23	1,15	1,03
C114x3_275_15	673,6	611,5	794,7	671,9	0,91	1,16	1,30	1,00
C152x3_275_15	939,7	913,4	1039,8	913,3	0,97	1,11	1,14	0,97
C219x4_235_15	1814,7	1680,5	1866,5	1423,8	0,93	1,03	1,11	0,78
C219x4_355_15	2244,3	2189,0	2523,9	1867,2	0,98	1,12	1,15	0,83
Vidurkis:					0,97	1,13	1,17	0,92

15 lentelė. Kvadrinių kolonų ribinės apkrovos

Kolona	$P_{u,Exp}$ (kN) [8]	$P_{u,Num}$ (kN)	$P_{u,EC4}$ (kN)	$P_{u,Est}$ (kN)	$P_{u,Num}$ / $P_{u,Exp}$	$P_{u,EC4}$ / $P_{u,Exp}$	$P_{u,EC4}$ / $P_{u,Num}$	$P_{u,Est}$ / $P_{u,Exp}$
S100x3_235_0	724,1	708,7	685,3	-	0,98	0,95	0,97	-
S100x3_355_0	851,8	863,6	894,6	-	1,01	1,05	1,04	-
S150x3_235_0	1367,5	1451,1	1291,0	-	1,06	0,94	0,89	-
S220x4_235_0	2520,5	3056,5	2560,4	-	1,21	1,02	0,84	-
S220x5_355_0	-	3736,0	3262,6	-	-	-	0,87	-
Vidurkis:					1,07	0,99	0,92	-
S100x3_235_5	692,1	648,3	602,6	-	0,94	0,87	0,93	-
S100x3_355_5	805,7	800,9	813,2	-	0,99	1,01	1,02	-
S150x3_235_5	1156,6	1275,2	1096,4	-	1,10	0,95	0,86	-
S220x4_235_5	2261,6	2657,6	2135,7	-	1,18	0,94	0,80	-
S220x5_355_5	2969,4	3348,6	2846,2	-	1,13	0,96	0,85	-
Vidurkis:					1,07	0,95	0,89	-
S100x3_235_15	523,0	512,4	492,6	-	0,98	0,94	0,96	-
S100x3_355_15	691,0	665,2	704,7	-	0,96	1,02	1,06	-
S150x3_235_15	824,4	977,4	837,6	-	1,19	1,02	0,86	-
S220x4_235_15	1690,8	1950,0	1571,0	-	1,15	0,93	0,81	-
S220x5_355_15	2393,3	2643,5	2292,3	-	1,10	0,96	0,87	-
Vidurkis:					1,08	0,97	0,91	-

2.4. Optimalaus skerspjūvio nustatymas

Remiantis anksčiau atliktų skaitinių rezultatų duomenimis ir metodika, sudaromi apvalaus ir kvadratinio skerspjūvio profiliai, kurių plieno ir betono skerspjūvio plotai būtų artimi santykiui 1:1. Tokių kolonų geometrija pateikiama 16 lentelėje. Čia galima matyti, kad parinkto apvalaus ir kvadratinio skerspjūvio kolonų betono plotas atitinkamai 8121 mm² ir 8107 mm², o plieno 1878 mm² ir 1892 mm². Skaičiuojamas 100x100 mm kvadratinis profilis ir 112 mm skersmens apvalus profilis. Sienelių storis 5 mm, o kolonų aukštis 500 mm.

16 lentelė. Apvalaus ir kvadratinio kolonų geometrija optimalaus skerspjūvio nustatymui

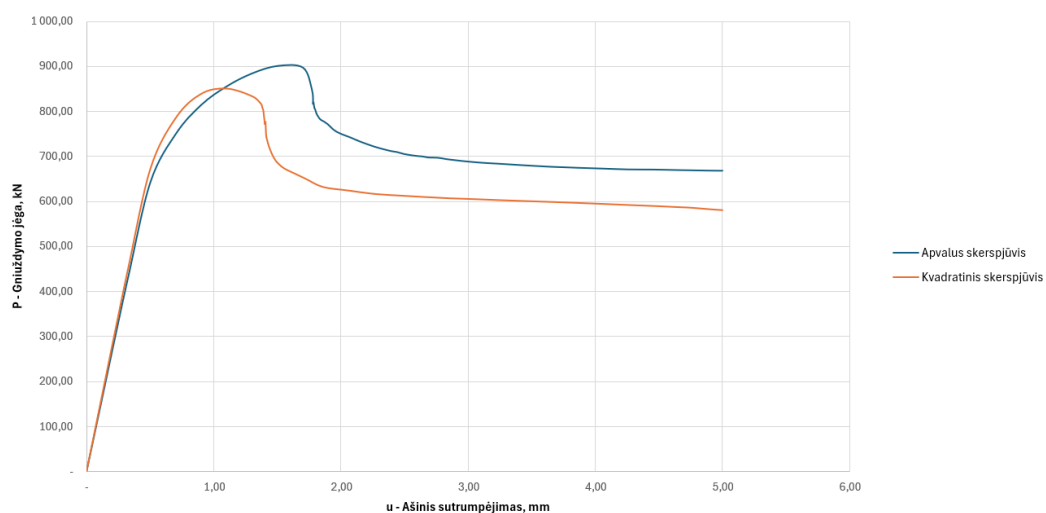
Geometrija	B [mm]	b [mm]	D [mm]	t [mm]	r _e [mm]	H [mm]	$A_{concrete}$ (mm ²)	A_{steel} (mm ²)
Apvalus skerspjūvis	-	-	112	5	-	500	8121	1878
Kvadratinis skerspjūvis	100	100	-	5	10	500	8107	1892

Atliekami skaičiavimai S235 plieno klasės kolonomis, su 0 % (NC), 5 % (RuC5) ir 15 % (RuC15) gumos kiekio betone. Rezultatai pateikti 17 lentelėje ir 7-9 paveikslėliuose. Atlikti skaičiavimai rodo, kad apvalus skerspjūvio kolonos gali atlaikyti didesnes ribines apkrovas nei kvadratinio skerspjūvio kolonos. Tai reiškia kad apvalaus skerspjūvio kolonos yra optimesnės nei kvadratinio skerspjūvio kolonos, tačiau pastebima, kad didėjant gumos procento kiekiui betone, skirtumas tarp apvalaus ir

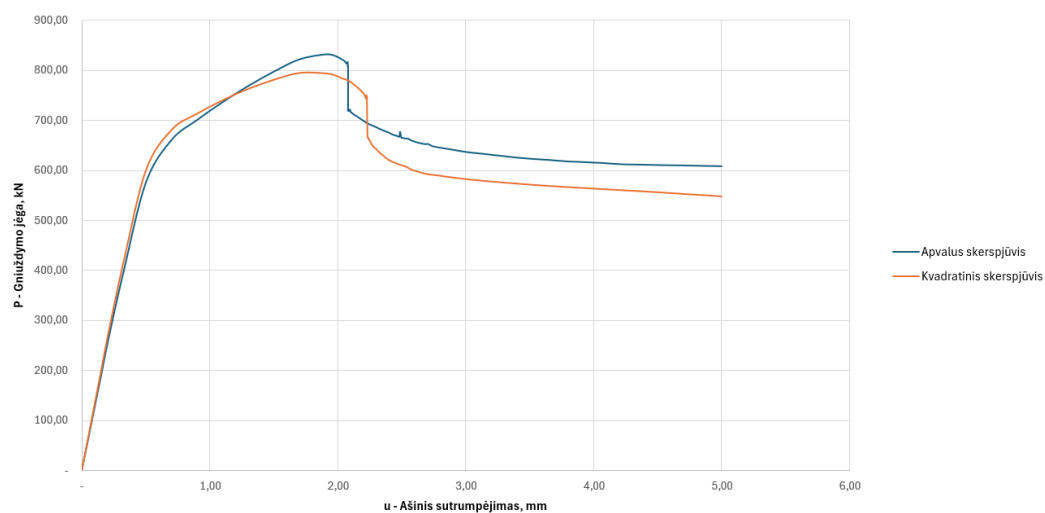
kvadratinio skerspjūvio ribinių apkrovų mažėja. Kvadratinis skerspjūvis atlaiko 6 % mažiau apkrovos su NC betono mišiniu nei apvalus skerspjūvis, o su RuC5 ir RuC15 betono mišiniu atitinkamai 5 % ir 2 % mažiau.

17 lentelė. Skaitinės analizės kolonų ribinės apkrovos optimalaus skerspjūvio nustatymui

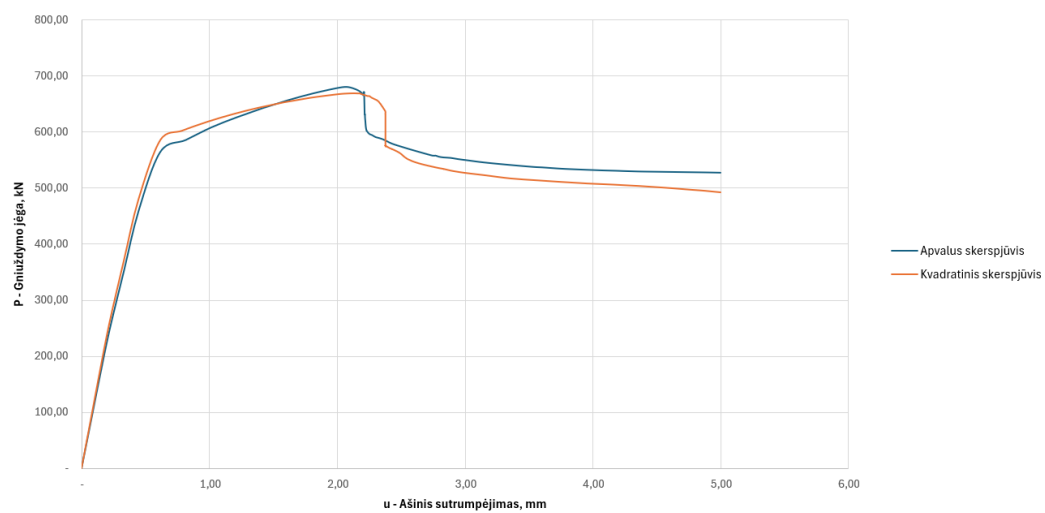
Geometrija	Betonas	P_u (kN)
Apvalus skerspjūvis	NC	901,4
	RuC5	832,1
	RuC15	680,5
Kvadratinis skerspjūvis	NC	850,7
	RuC5	795,6
	RuC15	668,7



10 pav. Skaitinės analizės kolonų su NC P-u kreivės optimalaus skerspjūvio nustatymui



11 pav. Skaitinės analizės kolonų su RuC5 P-u kreivės optimalaus skerspjūvio nustatymui



12 pav. Skaitinės analizės kolonų su RuC15 P-u kreivės optimalaus skerspjūvio nustatymui

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė parodė, kad padangų atliekų integracija į betoną leidžia mažinti aplinkos taršą ir prisideda prie žiedinės ekonomikos principų įgyvendinimo. Nustatyta, kad kolonų mechaninės savybės priklauso nuo skerspjūvio formos. Apvalaus skerspjūvio kolonos pasižymi didesniu plastiškumu, tolygesniu įtempių pasiskirstymu ir geresnėmis deformacinėmis savybėmis, todėl jos tinkamesnės didelėms ašinėms apkrovoms bei seisminiams poveikiams. Kvadratinio skerspjūvio kolonos yra standesnės ir turi geresnį lenkimo atsparumą, tačiau yra jautresnės vietinėms deformacijoms.
2. Atlikus skaitinius ir analitinius skaičiavimus nustatyta plieninių profilių skerspjūvių elgsena, kai jie užpildyti betonu, turinčiu padangų atliekų.
Nustatyta, kad, pakeitus įprastą betoną (NC) į betoną su 5 % (RuC5) ir 15 % (RuC15) gumos priemaišų, kolonų gniuždomasis stipris vidutiniškai sumažėja atitinkamai apie 10 % ir 30 %. Nustatyta, kad skaitinis modelis pervertina konstrukcijų elgseną lyginant su eksperimentiniais rezultatais – vidutiniškai ribinių apkrovų santykis apvaliose kolonose iki 8 % didesnis, kvadratinėse kolonose – iki 5 %.
Analizuojant galiojančius standartus nustatyta, kad Eurokodas 4 (EN 1994-1-1) gali būti taikomas projektavimo vertinimui plieninių kolonų, užpildytų betonu su gumos priemaišomis (RuCFST), atveju, tačiau gauti rezultatai rodo, kad esami metodai nėra visiškai tiksūs. Apvalaus skerspjūvio kolonų stiprio prognozės pagal EC4 buvo vidutiniškai 11 % pervertintos, tuo tarpu kvadratinė – 3–5 % nuvertintos. Tokie rezultatai rodo, kad EC4 metodika yra patikimesnė kvadratinėms profilams, o apvaliems reikalingi pataisos koeficientai.
3. Skaičiavimai rodo, kad apvalaus skerspjūvio kolonos gali atlaikyti didesnes ribines apkrovas nei kvadratinio skerspjūvio kolonos, todėl apvalaus skerspjūvio kolonos yra optimesnės. Didėjant gumos procento kiekiui betone, skirtumas tarp apvalaus ir kvadratinio skerspjūvio ribinių apkrovų mažėja. Kvadratinis skerspjūvis atlaiko 6% mažiau apkrovos su NC betono mišiniu nei apvalus skerspjūvis, o su RuC5 ir RuC15 betono mišiniu atitinkamai 5 % ir 2 %.
4. RuCFST konstrukcijos yra perspektyvios tvarios statybos kontekste. Šios konstrukcijos gali būti taikomos žemės drebėjimų zonose, transporto infrastruktūroje ir pramoniniuose pastatuose, kur reikalingas didesnis plastiškumas ir smūgių sugertis. Gumos atliekų įtraukimas į betoną mažina aplinkos taršą ir prisideda prie žiedinės ekonomikos principų įgyvendinimo, todėl toks sprendimas yra ne tik konstrukciškai pagrįstas, bet ir ekologiškai naudingas.

Literatūros sąrašas

1. Sienkiewicz, M.; Kucinska-Lipka, J.; Janik, H.; Balas, A. Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management* [interaktyvus]. 2012, 32, 1742-1751 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.010>
2. Dong, M.; Elchalakani, M.; Karrech, A.; Fawzia, S.; Ali, M.; Yang, B.; Xu, S. Circular steel tubes filled with rubberised concrete under combined loading. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2019, 162, 105613 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.003>
3. Elghazouli, A.; Mujdeci, A.; Bompa, D.; Guo, Y. Experimental cyclic response of rubberised concrete-filled steel tubes. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2022, 199, 107622 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107622>
4. Duarte, A.; Silvestre, N.; Brito, J.; Júlio, E. Numerical study of the compressive mechanical behaviour of rubberized concrete using the eXtended Finite Element Method (XFEM). *Composite Structures* [interaktyvus]. 2017, 179, 132-145 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.048>
5. Mujdeci, A.; Guo, Y.; Bompa, D.; Elghazouli A. Performance of circular steel tubes infilled with rubberised concrete under cyclic loads. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2024, 302, 117327 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117327>
6. Xiong, M.; Xiong, D.; Richard Liew, J. Axial performance of short concrete filled steel tubes with high- and ultra-high- strength materials. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2017, 136, 494-510 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.037>
7. Han, L.; Li, W.; Bjorhovde, R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2014, 100, 211-228 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.016>
8. Duarte, A.; Silva, B.; Silvestre, N.; Brito, J.; Júlio, E.; Castro, J. Tests and design of short steel tubes filled with rubberised concrete. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2016, 112, 274-286 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.018>
9. Elchalakani, M.; Hassanein, M.; Karrech, A.; Fawzia, S.; Yang, B.; Patel, V. Experimental tests and design of rubberised concrete-filled double skin circular tubular short columns. *Structures* [interaktyvus]. 2018, 15, 196-210 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.07.004>
10. Abedeen, A.; Yossef, N.; Hadidy A. Experimental study of steel single skin, double skin and dual tubes stub columns filled with rubberized concrete. *Structures* [interaktyvus]. 2024, 70, 107878 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107878>
11. Shovona Khusru, S.; Fawzia, S.; Thambiratnam, D.; Elchalakani, M. A parametric study: High performance double skin tubular column using rubberised concrete. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2020, 235, 111741 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111741>
12. Akter, M; Sulong, N.; Ayough, P.; Tafsirojjaman, T.; Fawzia, S. Flexural behavior of circular rubberized concrete-filled double-skin steel tubular beams: Experiments. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2024, 306, 117816 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117816>
13. Ayough, P.; Ibrahim, Z.; Sulong, N.; Hsiao, P.; Elchalakani, M. Numerical analysis of square concrete-filled double skin steel tubular columns with rubberized concrete. *Structures*

- [interaktyvus]. 2021, 32, 1026-1047 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.054>
14. Elchalakani, M.; Hassanein, M.; Karrech, A.; Yang, B. Experimental investigation of rubberised concrete-filled double skin square tubular columns under axial compression. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2018, 171, 730-746 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.123>
 15. Manisha, S.; Vinoth, S.; Shunmugaraj, M.; Kumar, M.; Yadav, Y. Double skin rubberized steel fiber mixed composite column. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2022, 68, 2175-2181 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.418>
 16. Colom, X.; Cañavate, J.; Carrillo, F.; Velasco, J.; Pagès, P.; Mujal, R.; Nogués, F. Structural and mechanical studies on modiWed reused tyres composites. *European Polymer Journal* [interaktyvus]. 2006, 42, 2369-2378 [žiūrėta 2025-03-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2006.06.005>
 17. Nematzadeh, M.; Memarzadeh, A.; Karimi, A. Post-fire elastic modulus of rubberized fiber-reinforced concrete-filled steel tubular stub columns: Experimental and theoretical study. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2020, 175, 106310 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106310>
 18. Wang, Y.; Zeng, W.; Ayough, P.; Ren, W.; Wang, W.; Loganathan, L.; Yap, S. Axial compression performance of rubberized concrete-filled steel tubular stub columns after fire exposure: Experimental investigation and calculation models. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2024, 438, 137129 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137129>
 19. Marques, A.; Correia, J.; Brito, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. *Fire Safety Journal* [interaktyvus]. 2013, 58, 49-57 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.02.002>
 20. Bengar, H.; Shahmansouri, A.; Sabet, N.; Kabirifar, K.; Tam, V. Impact of elevated temperatures on the structural performance of recycled rubber concrete: Experimental and mathematical modeling. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 255, 119374 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119374>
 21. Gupta, T.; Siddique, S.; Sharma, R.; Chaudhary, S. Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2017, 137, 35-45 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.065>
 22. Mahmod, H.; Aznieta, A.; Gatea, S. Evaluation of rubberized fibre mortar exposed to elevated temperature using destructive and non-destructive testing. *KSCCE Journal of Civil Engineering* [interaktyvus]. 2017, 21, 1347-1358 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0721-0>
 23. Feng, M.; Liu, B.; Zhang, L.; Wang, Y.; Sun, H. Seismic behavior of embedded rubberized concrete-filled corrugated steel tube column-to-foundation connections: Experimental, numerical modelling, and design. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* [interaktyvus]. 2024, 176, 108285 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108285>
 24. Wang, Y.; Yang, L.; Yang, H.; Liu, C. Behaviour of concrete-filled corrugated steel tubes under axial compression. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2019, 183, 475-495 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.093>
 25. Tanga, Y.; Zhu, M.; Chen, Z.; Wu, C.; Chen, B.; Li, C.; Li, L. Seismic performance evaluation of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns with field strain detected via a novel

- mark-free vision method. *Structures* [interaktyvus]. 2022, 37, 426-441 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.055>
26. Ami, M.; Zahrai, S. Compressive behavior and design of octagonal rubberized concrete-filled double steel tubular stub columns stiffened by headed studs. *Structures* [interaktyvus]. 2022, 42, 104-124 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.005>
 27. Han, X.; Ding, N.; Chen, A.; Wang, Z.; Xu, Y.; Feng, L.; Ji, Y.; Li, K.; Jing, J.; Sun, S.; Zhang, Q. Experimental study on freeze-thaw failure of concrete incorporating waste tire crumb rubber and analytical evaluation of frost resistance. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2024, 439, 137356 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137356>
 28. Taheri, B.; Ramezaniapour, A.; Sabokpa, S.; Gapele, M. Experimental evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2021, 33, 101617 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101617>
 29. Grinys, A.; Augonis, A.; Daukšys, M.; Pupeikis, D. Mechanical properties and durability of rubberized and SBR latex modified rubberized concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 248, 118584 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118584>
 30. Lu, S.; Yang, J.; Wang, J.; Huang, L.; Wang, L. Behavior of steel tubed rubberized geopolymer concrete columns under axial compression: Experimental study and analytical modeling. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2024, 302, 117389 [žiūrėta 2025-05-24]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117389>
 31. *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-6 dalis. Kevalinių konstrukcijų stipris ir stabilumas*. LST EN 1993-1-6:2007 Lietuvos standartizacijos departamentas
 32. Neville, AM. Properties of concrete. *5th edition*, 2012.
 33. Duarte, APC.; Silva, BA.; Silvestre, N.; de Brito, J.; Júlio, E. Mechanical characterization of rubberized concrete using an image-processing/XFEM coupled procedure. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. 2015, 78, 214-226 [žiūrėta 2025-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.082>
 34. Silvestre, N.; Faria, B.; Lopes, JNC. Compressive behavior of CNT-reinforced aluminum composites using molecular dynamics. *Composites Science and Technology* [interaktyvus]. 2014, 90, 16-24 [žiūrėta 2025-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.09.027>
 35. Vermeer, PA.; de Borst, R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Journal Article*, 1984.
 36. Kwasniewski, M.; Rodríguez-Oitabén, P. Harmonising Rock Engineering and the Environment, 2011.
 37. Hu, HT.; Huang, CS.; Wu, MH.; Wu, YM. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. *Journal of Structural Engineering* [interaktyvus]. 2003, 129, 10 [žiūrėta 2025-10-18]. Prieiga per: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:10\(1322\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322))
 38. Ellobody, E.; Young, B.; Lam, D. Behaviour of normal and high strength concrete filled compact steel tube circular stub columns. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2006, 62, 706-715 [žiūrėta 2025-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.11.002>
 39. Ellobody, E.; Young, B. Nonlinear analysis of concrete-filled steel SHS and RHS columns. *Thin-Walled Structures* [interaktyvus]. 2006, 44, 919-930 [žiūrėta 2025-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.07.005>

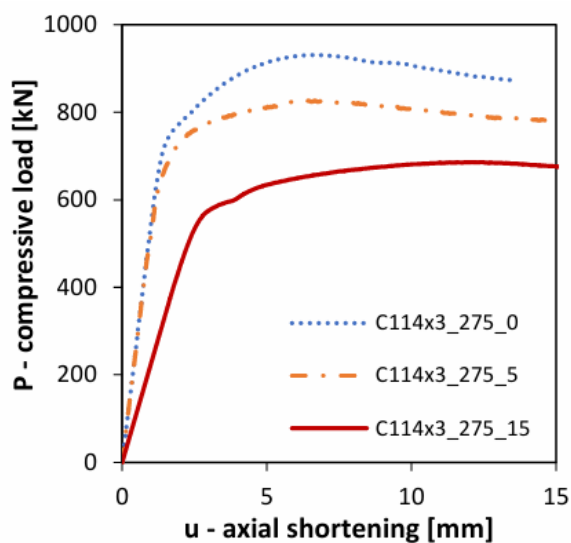
40. Youssf, O.; ElGawady, MA.; Mills, JE.; Ma, X. An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2014, 53, 522-532 [žiūrėta 2025-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.007>
41. Lacroix, EA. Comparative study of strength design methods for rectangular reinforced concrete and composite steel-concrete columns. *MSc thesis in civil engineering*, 1997
42. *Eurokodas 4. Kompozitinių plieninių-betoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. LST EN 1994-1-1:2005/NA:2010 Lietuvos standartizacijos departamentas.
43. Mander, JB.; Priestley, MJM.; Park, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 114(8): 1804-1826, 1988.
44. Richart, FE.; Brandtzaeg, A.; Brown, RL. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses, *Engineering Experiment Station*, 1928.
45. Balmer, GG. Shearing strength of concrete under high triaxial stress - computation of Mohr's envelope as a curve, *Structural Research Laboratory*, 1944.
46. Boresi, AP, Schmidt, RJ. Advanced mechanics of materials. *6th Edition*, 2003.
47. Duarte, A.; Silva, B.; Silvestre, N.; Brito, J.; Júlio, E.; Castro, J. Finite element modelling of short steel tubes filled with rubberized concrete. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2016, 150, 28-40 [žiūrėta 2025-10-18]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.048>

Priedai

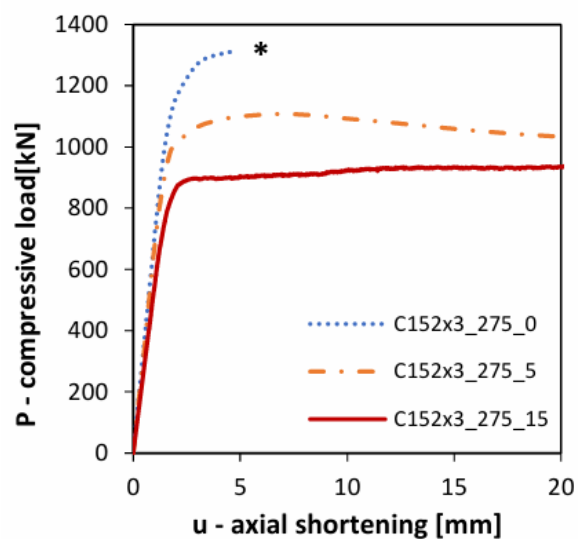
1 priedas. DI naudojimo deklaracija

Šiame darbe DI įrankiai nebuvo naudojami.

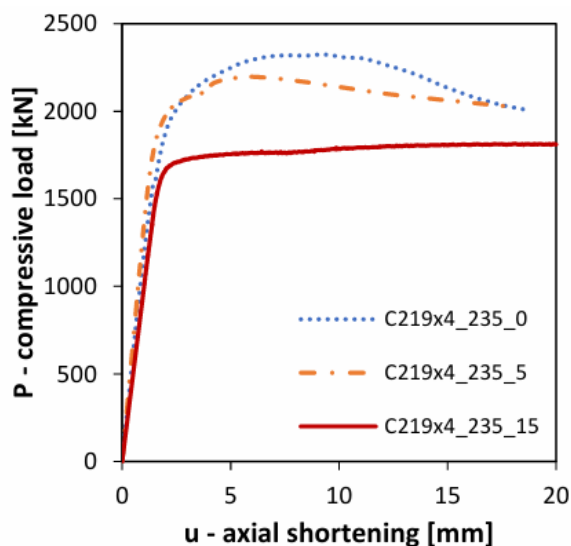
2 priedas. Eksperimentiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės apvalaus skerspjuvio kolonomis



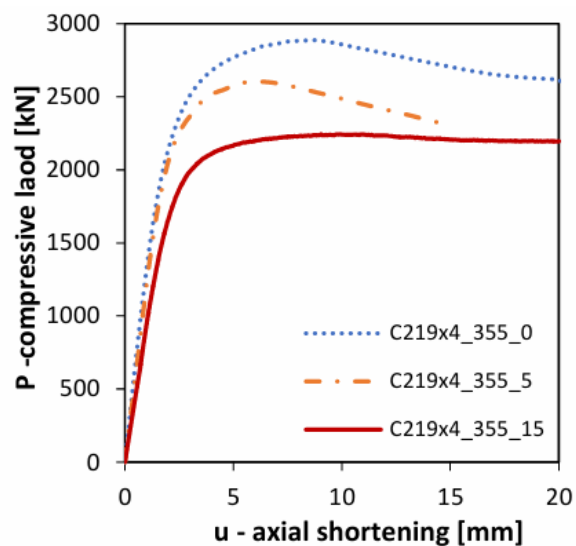
(a)



(b)



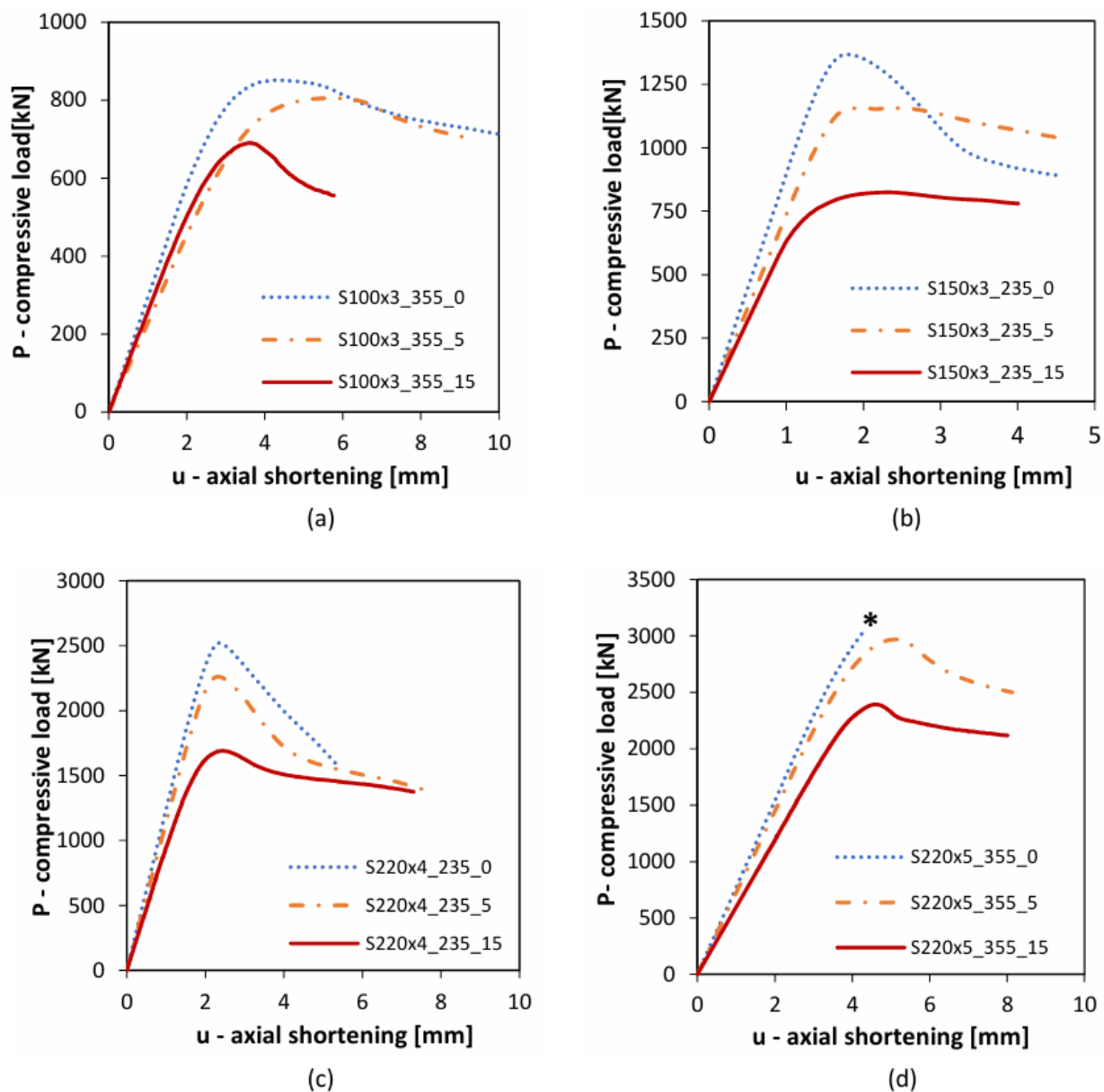
(c)



(d)

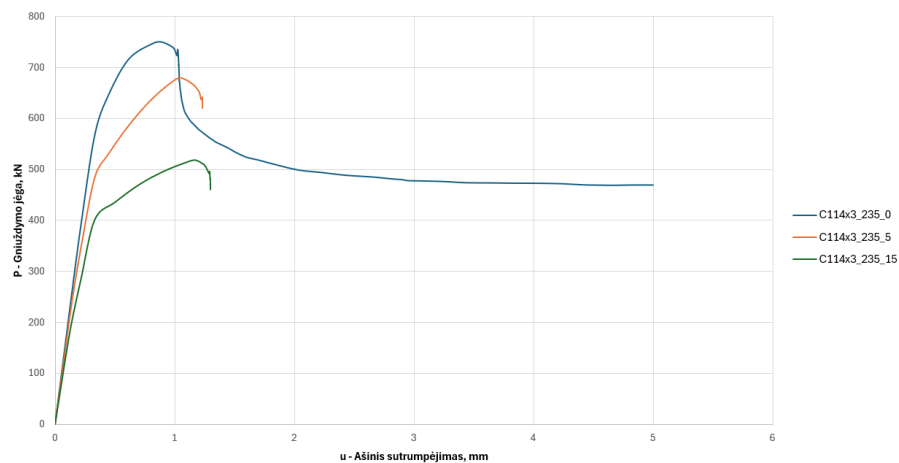
13 pav. Eksperimentinės P-u kreivės apvalaus skerspjuvio kolonomis: (a) C114x3_275_0/5/15, (b) C152x3_275_0/5/15, (c) C219x4_235_0/5/15, (d) C219x4_355_0/5/15 [8]

3 priedas. Eksperimentiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės kvadratinio skerspjūvio kolonomis

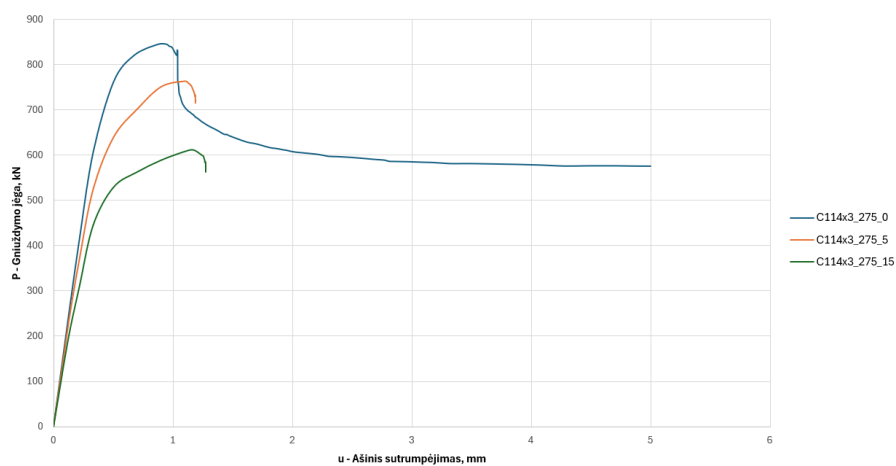


14 pav. Eksperimentinės P-u kreivės kvadratinio skerspjūvio kolonomis: (a) S100x3_355_0/5/15, (b) S150x3_235_0/5/15, (c) S220x4_235_0/5/15, (d) S220x5_355_0/5/15 [8]

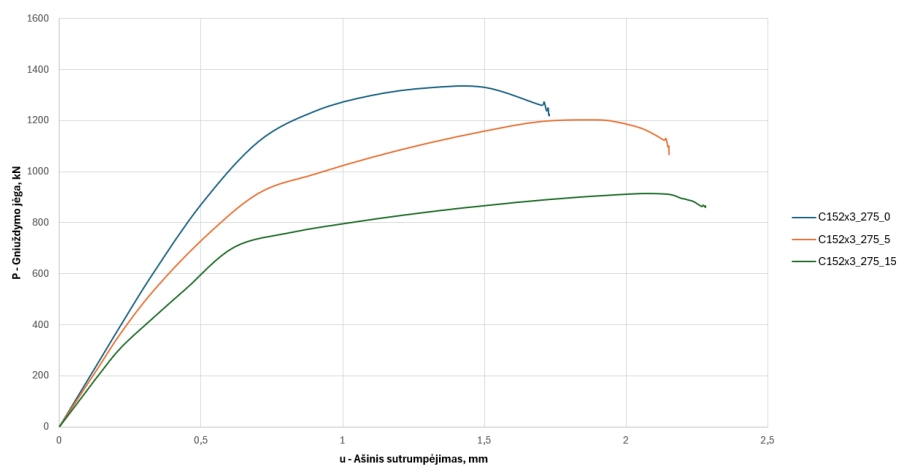
4 priedas. Skaitiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės apvalaus skerspjūvio kolonoms



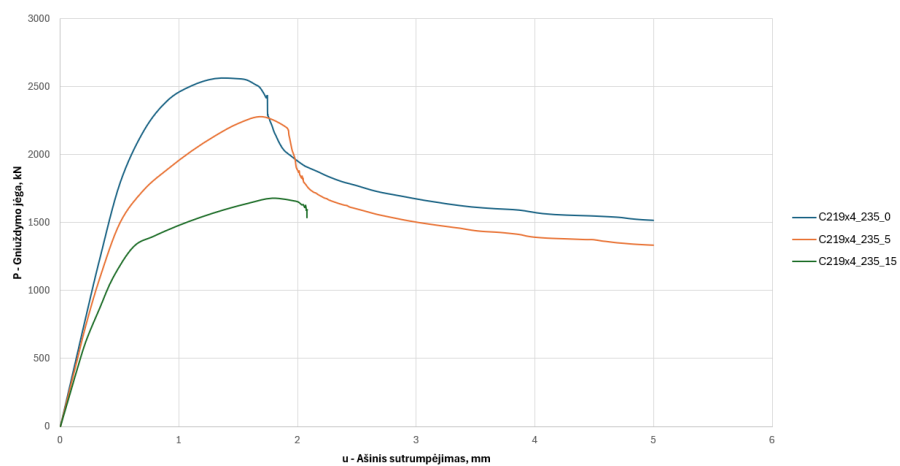
15 pav. Apvalios C114x3_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės



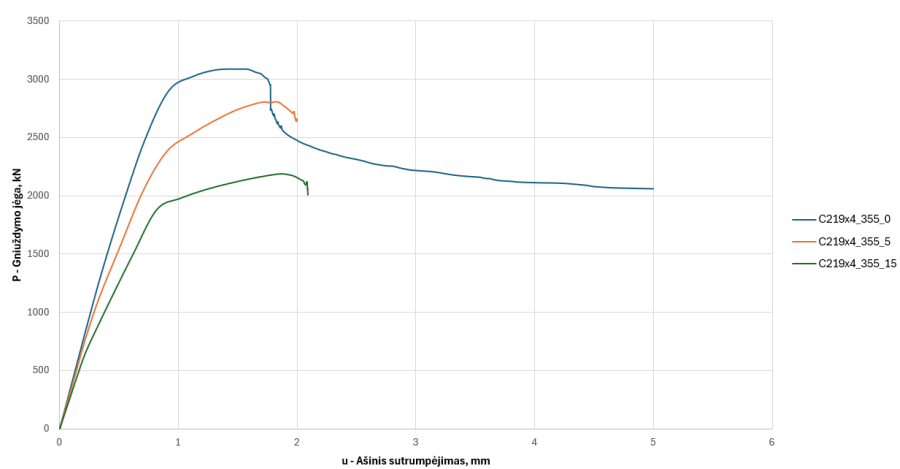
16 pav. Apvalios C114x3_275_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės



17 pav. Apvalios C152x3_275_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės

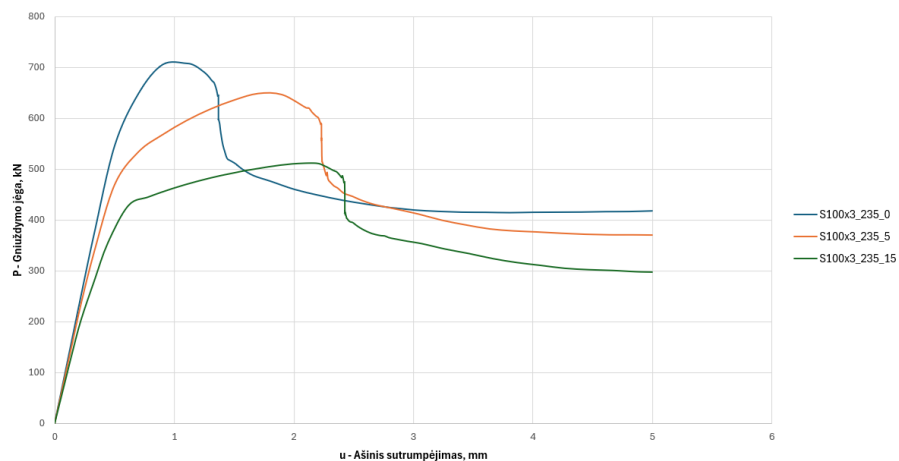


18 pav. Apvalios C219x4_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės

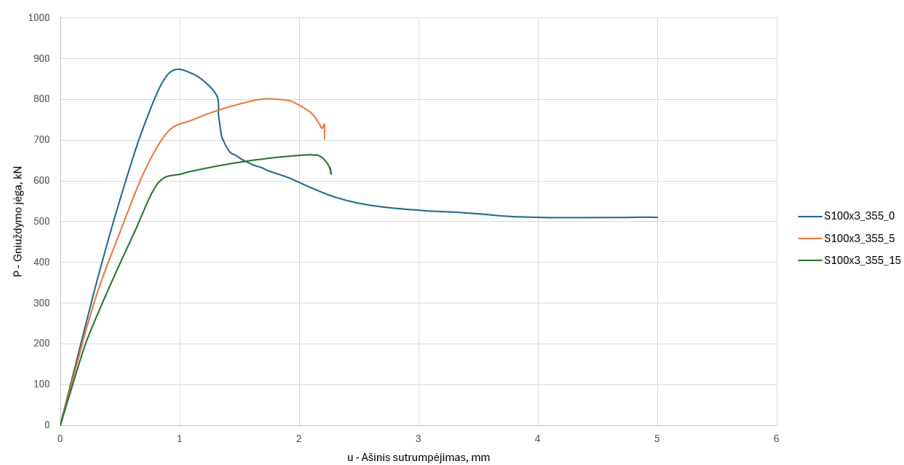


19 pav. Apvalios C219x4_355_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės

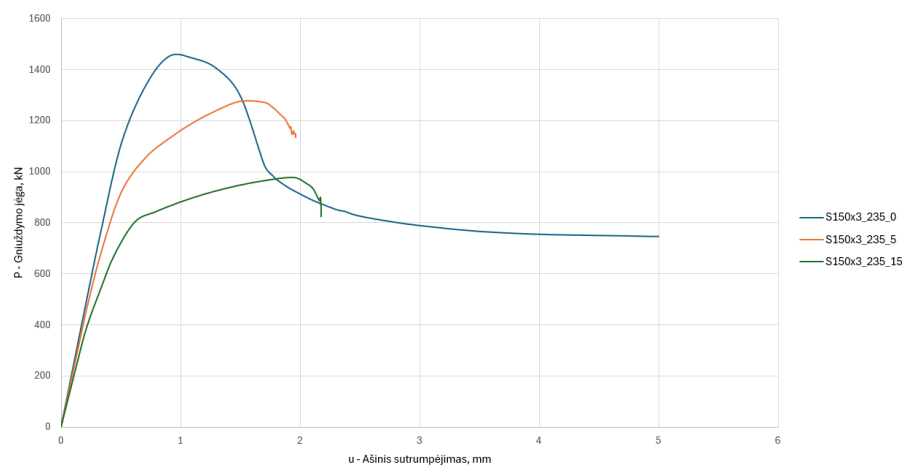
5 priedas. Skaitiniai tyrimo rezultatai: P-u kreivės kvadratinio skerspjūvio kolonoms



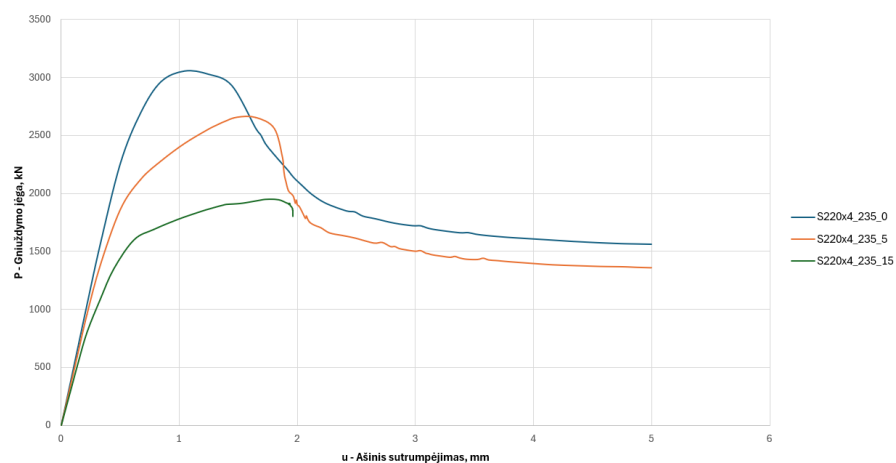
20 pav. Kvadratinės S100x3_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės



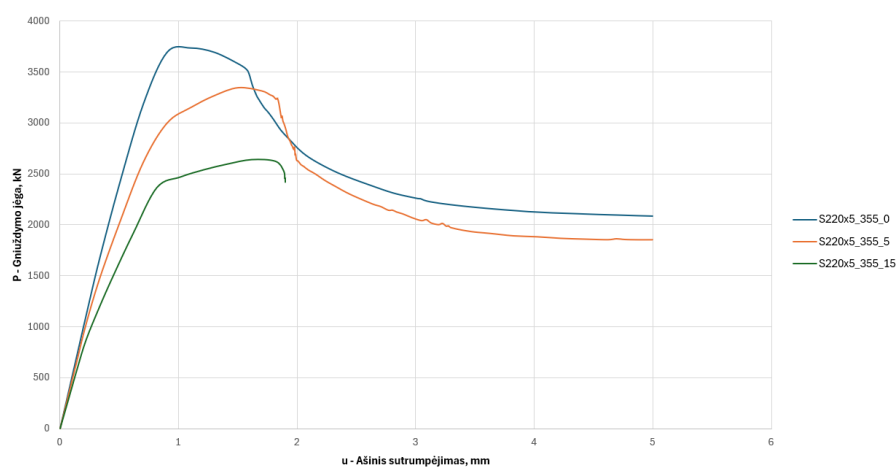
21 pav. Kvadratinės S100x3_355_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės



22 pav. Kvadratinės S150x3_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės



23 pav. Kvadratinės S220x4_235_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės



24 pav. Kvadratinės S220x5_355_0/5/15 kolonos skaitinės P-u kreivės



CERTIFICATE

Iveta Malinauskaitė

Has participated in Student scientific conference
„SMART BUILT ENVIRONMENT“
on 5 December 2025

Delivered the presentation:
Research of Steel Columns Filled with Rubberized Concrete

Dean of the Faculty of Civil
Engineering and Architecture

Prof. Dr. Andrius Jurelionis

